

# **Estudo numérico do escoamento em condutas com bifurcação em regime laminar**

*Márcio Alexandre Magalhães Fraga Quintela*

**Dissertação do MIEM**

*Orientador: Prof. Fernando Tavares de Pinho*



**Universidade do Porto**

**Faculdade de Engenharia**

**FEUP**

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

*Março de 2015*

*<À minha mãe>*

## **Resumo**

De modo a entender os fenómenos físicos associados a escoamentos de regime laminar em condutas de secção retangular com bifurcação, e a preencher a falha presente nesta área, levou-se a cabo um extenso estudo numérico onde se fez variar diferentes parâmetros dinâmicos (número de *Reynolds* –  $Re_{D_{hid}}$  e fração de caudal –  $\beta$ ) e diferentes parâmetros geométricos (ângulo de inclinação –  $\theta$ , altura das condutas –  $H_1$ ,  $H_2$  e  $H_3$ , e profundidade –  $E$ ). Este estudo tem em vista a compreensão da influência dos mesmos nas regiões de escoamento separado – horizontal e vertical – e nos coeficientes de perda de carga.

Os resultados obtidos mostram que os coeficientes de perda de carga – parciais e total – variam inversamente com o número de *Reynolds* em qualquer caso geométrico estudado, bem como com qualquer fração de caudal.

Números de *Reynolds* baixos, normalmente inferiores a 20, apresentaram elevados coeficientes de perda de carga devido ao domínio das forças viscosas. Números de *Reynolds* elevados apresentaram um escoamento dominado por forças de inércia cujos coeficientes de perda de carga se revelaram baixos e praticamente constantes.

Ambas as regiões de escoamento separado – horizontal e vertical – mostraram-se fortemente dependentes do número de *Reynolds* e da fração de caudal, tendo ocorrido com mais frequência e com maiores comprimentos quando o escoamento é dominado por forças de inércia.

## **Abstract**

In order to understand the physical phenomena associated with rectangular duct laminar flow in branches and fulfil the gap in this area, a numerical investigation was carried out to study the effect of such as the *Reynolds* number –  $Re_{D_{hid}}$  and flow rate ratio –  $\beta$ , as well as the effect of such geometric variables as the branch slope –  $\theta$ , ducts height –  $H_1$ ,  $H_2$  e  $H_3$ , and duct depth –  $E$ . This study intends to understand the influence of those variables in the length of the separated flow regions and on the pressure loss coefficient.

The results showed that both the partial and total pressure loss coefficient vary inversely with *Reynolds* number regardless of the geometry and flow rate ratio.

For *Reynolds* numbers below 20 high pressure loss coefficients were obtained in a region dominated by viscous forces. At high *Reynolds* numbers the flow is dominated by inertial forces and the pressure loss coefficients are lower and take on a constant value.

Both regions of separated flow – horizontal and vertical – appear to be strongly dependent on *Reynolds* number and flow rate ratio, and when the flow is dominated by inertia forces it occurs more often and with larger lengths.

## ***Agradecimentos***

Terminada esta fase importante da minha vida agradeço principalmente a minha mãe pelo acreditar e pelo seu esforço diário, tornando tudo muito mais fácil e eliminando a barreira do impossível.

Não posso deixar de agradecer aos meus amigos e namorada que sempre estiveram presentes quando foram precisos, e sempre me deram os melhores conselhos. Deixo um agradecimento especial ao meu camarada e engenheiro Zé Paulo pelo apoio prestado a todos os níveis ao longo destes curtos cinco anos.

Um agradecimento especial ao professor Fernando Pinho pela paciência, compreensão e pela sua vontade incontestável de ensinar. Sem o seu acompanhamento tudo teria sido menos claro. Não posso deixar de acrescentar que foi um ser seu orientando.

Um agradecimento especial ao professor Manuel Ferrari, que mesmo não estando presente no desenvolvimento da dissertação, considero um professor que marcou profundamente a minha formação académica.

## Índice de Conteúdos

1.	Introdução e Objetivos .....	1
1.1.	Enquadramento .....	1
1.2.	Revisão Bibliográfica .....	2
1.3.	Objetivos.....	3
2.	Teoria.....	4
2.1.	Regimes Laminar e Turbulento.....	4
2.2.	Perdas de Carga .....	4
2.2.1.	Perdas de Carga em Linha.....	4
2.2.2.	Perdas de Carga Localizadas .....	6
2.3.	Separação do Escoamento.....	8
3.	Equações Governativas e Método Numérico.....	9
3.1.	Equações Governativas.....	9
3.1.1.	Princípio da Conservação da Massa .....	9
3.1.2.	Equação da Quantidade de Movimento .....	9
3.2.	Método Numérico .....	9
3.2.1.	Dinâmica de Fluidos Computacional .....	9
3.2.2.	Esquema de Discretização.....	10
3.2.3.	Geometria e Casos de Estudo.....	10
3.2.4.	Domínio de Cálculo .....	11
3.2.5.	Malha Computacional.....	13
3.2.6.	Condições de Fronteira .....	17
3.2.7.	Solução Inicial .....	19
3.2.8.	Número de Iterações.....	19
3.2.9.	Número de Courant.....	19
4.	Verificação do Método .....	22
5.	Método de Processamento de Dados.....	26
5.1.	Algoritmo.....	26
5.1.1.	Critério de Desenvolvimento .....	27
5.1.2.	Cálculo dos Coeficientes de Perda de Carga.....	29
5.1.3.	Cálculo dos Comprimentos de Escoamento Separado .....	30
5.2.	Análise de Incerteza.....	31
6.	Apresentação e Discussão de Resultados .....	32
6.1.	Caso base .....	34

6.1.1.	Comprimentos de Escoamento Separado .....	34
6.1.2.	Coeficientes de perda de carga.....	35
6.2.	Efeito do parâmetro geométrico $\theta$ .....	37
6.2.1.	Comprimentos de Escoamento Separado .....	37
6.2.2.	Coeficientes de Perda de Carga .....	39
6.3.	Efeito do parâmetro geométrico $H_2/H_1$ .....	40
6.3.1.	Comprimentos de Escoamento Separado .....	40
6.3.2.	Coeficientes de perda de carga.....	42
6.4.	Efeito do parâmetro geométrico $H_3/H_1$ .....	43
6.4.1.	Comprimentos de Escoamento Separado .....	43
6.4.2.	Coeficientes de Perda de Carga .....	44
6.5.	Efeito do parâmetro geométrico $E/H_1$ .....	46
6.5.1.	Comprimentos de Escoamento Separado .....	46
6.5.2.	Coeficientes de perda de carga.....	50
7.	Conclusões .....	52
7.1.	Conclusões .....	52
7.2.	Sugestão para Trabalhos Futuros .....	53
8.	Referências .....	54
Anexo A –	Comprimentos de Escoamento separado.....	55
	Escoamento separado Vertical .....	55
	Caso Base e Parâmetro Geométrico $\theta$ .....	55
	Parâmetros Geométricos $H_2/H_1$ e $H_3/H_1$ .....	57
	Parâmetro Geométrico $E/H_1$ .....	60
	Escoamento separado Horizontal.....	63
	Caso Base e Parâmetro Geométrico $\theta$ .....	63
	Parâmetros Geométricos $H_2/H_1$ e $H_3/H_1$ .....	64
	Parâmetro Geométrico $E/H_1$ .....	65
Anexo B –	Coeficientes de Perda de Carga .....	67
	Caso Base e Parâmetro Geométrico $\theta$ .....	67
	Parâmetros Geométricos $H_2/H_1$ e $H_3/H_1$ .....	73
	Parâmetro Geométrico $E/H_1$ .....	78
Anexo C –	Análise de Incerteza aos Comprimentos de Escoamento separado .....	83
	Caso Base e Parâmetro Geométrico $\theta$ .....	83
	Parâmetros Geométricos $H_2/H_1$ e $H_3/H_1$ .....	85
	Parâmetro Geométrico $E/H_1$ .....	86

Anexo D – Análise de Incerteza aos Coeficientes de Perda de Carga.....	87
Caso Base e Parâmetro Geométrico $\theta$ .....	87
Parâmetros Geométricos $H_2/H_1$ e $H_3/H_1$ .....	89
Parâmetro Geométrico $E/H_1$ .....	90



## Índice de Figuras

Figura 1 – Microreator para produção de biodiesel desenvolvido por Goran Jovanic – Oregon State University.....	1
Figura 2 – Conduto com bifurcação. ....	6
Figura 3 – Gradiente de pressão adverso e separação do escoamento (9) .....	8
Figura 4 – Conduto de secção retangular com bifurcação e respectivas dimensões. ....	10
Figura 5 – Geometria dos casos de estudo.....	11
Figura 6 – Dimensões principais do domínio de cálculo e blocos para a geração da malha.....	11
Figura 7 – Dimensões secundárias do domínio de cálculo. ....	12
Figura 8 – Referencial local de cada bloco da malha computacional.....	14
Figura 9 – Configuração geral da malha computacional .....	15
Figura 10 – Exemplo de secção transversal da conduta ( $6 \times 4$ ).....	18
Figura 11 – Somatório do número de iterações nas equações $u$ , $v$ , $w$ e $p$ em função do número de <i>Courant</i> e <i>Reynolds</i> para frações de caudal $\beta = 0,1$ e $\beta = 0,9$ (domínio de cálculo do caso base e malha de $N = 11$ ) .....	20
Figura 12 – $\overline{Co_{min}}$ em função do número de <i>Reynolds</i> .....	21
Figura 13 – Secção retangular de lados $2e$ e $2h$ .....	22
Figura 14 – Escoamento entre duas placas paralelas.....	23
Figura 15 – Perfil de velocidade $u$ teórico e das malhas M1, M2 e M3 para um escoamento entre placas paralelas de $h = 0,005$ [m] .....	24
Figura 16 – Mudança de referencial da conduta 3.....	26
Figura 17 – Regiões de escoamento desenvolvido e referencial de cada conduta... ..	29
Figura 18 – Regiões de escoamento separado vertical e horizontal.....	30
Figura 19 – Determinação do início da região de escoamento separado vertical. ....	30
Figura 20 – Esquema de extrapolação de <i>Richardson</i> .....	31
Figura 21 – Comprimentos de escoamento separado, vertical (à esq.) e horizontal (à dir.), para o caso base (adimensionais) e em função da fração de caudal $\beta$ . ....	34
Figura 22 – Comprimentos de escoamento separado, vertical (à esq.) e horizontal (à dir.), para o caso base (adimensionais) e em função do número de <i>Reynolds</i> . ....	35
Figura 23 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita – $K_{12}$ , $K_{13}$ e $K$ ) para o caso base e em função do número de <i>Reynolds</i> .....	36
Figura 24 – Coeficientes de perda de carga (da esquerda para a direita – $K_{12}$ , $K_{13}$ e $K$ ) para o caso base e em função da fração de caudal $\beta$ para $Re_{D_{hid}} \leq 20$ . ....	36
Figura 25 – Coeficientes de perda de carga (da esquerda para a direita – $K_{12}$ , $K_{13}$ e $K$ ) para o caso base e em função da fração de caudal $\beta$ para $Re_{D_{hid}} > 20$ . ....	37

Figura 26 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) em função do número de <i>Reynolds</i> para diferentes frações de caudal $\beta$ e diferentes valores de $\theta$ .	38
Figura 27 – Comprimentos de escoamento separado horizontal (adimensionais) em função do número de <i>Reynolds</i> para diferentes frações de caudal $\beta$ e diferentes valores de $\theta$ .	38
Figura 28 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita – $K_{12}$ , $K_{13}$ e $K$ ) em função do número de <i>Reynolds</i> para a fração de caudal $\beta = 0,1$ e diferentes valores de $\theta$ .	39
Figura 29 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita – $K_{12}$ , $K_{13}$ e $K$ ) em função do número de <i>Reynolds</i> para a fração de caudal $\beta = 0,9$ e diferentes valores de $\theta$ .	40
Figura 30 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) em função do número de <i>Reynolds</i> para diferentes frações de caudal $\beta$ e diferentes valores de $H_2/H_1$ .	41
Figura 31 – Comprimentos de escoamento separado horizontal (adimensionais) em função do número de <i>Reynolds</i> para diferentes frações de caudal $\beta$ e diferentes valores de $H_2/H_1$ .	41
Figura 32 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita – $K_{12}$ , $K_{13}$ e $K$ ) em função do número de <i>Reynolds</i> para a fração de caudal $\beta = 0,1$ e diferentes valores de $H_2/H_1$ .	42
Figura 33 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita – $K_{12}$ , $K_{13}$ e $K$ ) em função do número de <i>Reynolds</i> para a fração de caudal $\beta = 0,9$ e diferentes valores de $H_2/H_1$ .	43
Figura 34 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) em função do número de <i>Reynolds</i> para diferentes frações de caudal $\beta$ e diferentes valores de $H_3/H_1$ .	44
Figura 35 – Comprimentos de escoamento separado horizontal (adimensionais) em função do número de <i>Reynolds</i> para diferentes frações de caudal $\beta$ e diferentes valores de $H_3/H_1$ .	44
Figura 36 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita – $K_{12}$ , $K_{13}$ e $K$ ) em função do número de <i>Reynolds</i> para a fração de caudal $\beta = 0,1$ e diferentes valores de $H_3/H_1$ .	45
Figura 37 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita – $K_{12}$ , $K_{13}$ e $K$ ) em função do número de <i>Reynolds</i> para a fração de caudal $\beta = 0,9$ e diferentes valores de $H_3/H_1$ .	45
Figura 38 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) calculados no plano de simetria ( $z/E = 0,5$ ) em função do número de <i>Reynolds</i> para diferentes frações de caudal $\beta$ e diferentes valores de $E/H_1$ .	46
Figura 39 – Comprimentos de escoamento separado horizontal (adimensionais) calculados no plano de simetria ( $z/E = 0,5$ ) em função do número de <i>Reynolds</i> para diferentes frações de caudal $\beta$ e diferentes valores de $E/H_1$ .	47

Figura 40 – Posições (adimensionais) de início (curvas inferiores) e fim (curvas superiores) da região de escoamento separado vertical para $E/H_1 = 2$ e em função da coordenada $z$ (adimensional).....	48
Figura 41 – Posições (adimensionais) de início (curvas inferiores) e fim (curvas superiores) da região de escoamento separado horizontal para $E/H_1 = 2$ e em função da coordenada $z$ (adimensional).....	48
Figura 42 – Posições (adimensionais) de início (curvas inferiores) e fim (curvas superiores) da região de escoamento separado vertical para $E/H_1 = 0,25$ e em função da coordenada $z$ (adimensional).....	49
Figura 43 – Posições (adimensionais) de início (curvas inferiores) e fim (curvas superiores) da região de escoamento separado horizontal para $E/H_1 = 0,25$ e em função da coordenada $z$ (adimensional).....	50
Figura 44 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita – $K_{12}$ , $K_{13}$ e $K$ ) em função do número de <i>Reynolds</i> para a fração de caudal $\beta = 0,1$ e diferentes valores de $E/H_1$ .....	51
Figura 45 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita – $K_{12}$ , $K_{13}$ e $K$ ) em função do número de <i>Reynolds</i> para a fração de caudal $\beta = 0,9$ e diferentes valores de $E/H_1$ .....	51

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Domínios de cálculo .....	13
Tabela 2 – Número de divisões de cada bloco nas direções $\xi$ e $\zeta$ .....	15
Tabela 3 – Razões geométricas dos blocos 1, 5 e 7 das malhas M1, M2 e M3 .....	16
Tabela 4 – Número de volumes finitos das malhas M1, M2 e M3 das simulações bidimensionais.....	16
Tabela 5 – Número de volumes finitos das malhas M1, M2 e M3 das simulações tridimensionais.....	17
Tabela 6 – Velocidade de cada centróide .....	18
Tabela 7 – Influência das condições de entrada e solução inicial no número de iterações .....	19
Tabela 8 – Número de <i>Courant</i> para o qual o número de iterações é mínimo.....	21
Tabela 9 – Erros associados às malhas M1, M2 e M3 .....	25
Tabela 10 – Matrizes de armazenamento de dados e respetiva descrição .....	27
Tabela 11 – Incerteza associada aos comprimentos de escoamento separado vertical.....	32
Tabela 12 – Incerteza associada aos comprimentos de escoamento separado vertical.....	33
Tabela 13 – Incerteza associada aos coeficientes de perda de carga .....	33
Tabela 14 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) para o parâmetro geométrico $\theta$ em função do número de <i>Reynolds</i> e da fração de caudal $\beta$ .....	55
Tabela 15 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) para os parâmetros geométricos $H_2/H_1$ e $H_3/H_1$ em função do número de <i>Reynolds</i> e da fração de caudal $\beta$ .....	57
Tabela 16 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) para o parâmetro geométrico $E/H_1$ (e para $z/E = 0,50$ ) em função do número de <i>Reynolds</i> e da fração de caudal $\beta$ .....	60
Tabela 17 – Comprimentos de escoamento separado horizontal (adimensionais) para o parâmetro geométrico $\theta$ em função do número de <i>Reynolds</i> e da fração de caudal $\beta$ .....	63
Tabela 18 – Comprimentos de escoamento separado horizontal (adimensionais) para os parâmetros geométricos $H_2/H_1$ e $H_3/H_1$ em função do número de <i>Reynolds</i> e da fração de caudal $\beta$ .....	64
Tabela 19 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) para o parâmetro geométrico $E/H_1$ (e para $z/E = 0,50$ ) em função do número de <i>Reynolds</i> e da fração de caudal $\beta$ .....	65
Tabela 20 – Coeficientes de perda de carga para o parâmetro geométrico $\theta$ em função do número de <i>Reynolds</i> e da fração de caudal $\beta$ .....	67

Tabela 21 – Coeficientes de perda de carga para os parâmetros geométricos $H_2/H_1$ e $H_3/H_1$ em função do número de <i>Reynolds</i> e da fração de caudal $\beta$ .....	73
Tabela 22 – Coeficientes de perda de carga para o parâmetro geométrico $E/H_1$ (e para $z/E = 0,50$ ) em função do número de <i>Reynolds</i> .....	78
Tabela 23 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para o caso base.....	83
Tabela 24 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para o caso base .....	83
Tabela 25 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para $\theta = 70^\circ$ .....	83
Tabela 26 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para $\theta = 70^\circ$ .....	83
Tabela 27 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para $\theta = 80^\circ$ .....	84
Tabela 28 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para $\theta = 80^\circ$ .....	84
Tabela 29 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para $\theta = 100^\circ$ .....	84
Tabela 30 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para $\theta = 100^\circ$ .....	84
Tabela 31 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para $\theta = 110^\circ$ .....	84
Tabela 32 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para $\theta = 110^\circ$ .....	84
Tabela 33 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para $H_2/H_1 = 0,75$ .....	85
Tabela 34 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para $H_2/H_1 = 0,75$ .....	85
Tabela 35 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para $H_3/H_1 = 0,50$ .....	85
Tabela 36 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para $H_3/H_1 = 0,50$ .....	85
Tabela 37 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para $H_3/H_1 = 0,75$ .....	85
Tabela 38 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para $H_3/H_1 = 0,75$ .....	85
Tabela 39 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para $E/H_1 = 0,25$ .....	86
Tabela 40 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para $E/H_1 = 0,25$ .....	86

Tabela 41 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para $E/H_1 = 2$ .....	86
Tabela 42 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para $E/H_1 = 2$ .....	86
Tabela 43 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para o caso base.....	87
Tabela 44 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para $\theta = 70^\circ$	87
Tabela 45 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para $\theta = 80^\circ$	87
Tabela 46 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para $\theta = 100^\circ$ .....	88
Tabela 47 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para $\theta = 110^\circ$ .....	88
Tabela 48 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para $H_2/H_1 = 0,75$ .....	89
Tabela 49 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para $H_2/H_1 = 0,50$ .....	89
Tabela 50 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para $H_3/H_1 = 0,75$ .....	89
Tabela 51 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para $E/H_1 = 0,25$ .....	90
Tabela 52 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para $E/H_1 = 2$ .....	90

## Nomenclatura

### Símbolos Latinos

- $c$  – Comprimento de malha não uniforme da conduta  $i$  [ $m$ ]  
 $c_{dir_3}$  – Comprimento de malha uniforme à direita da conduta 3 [ $m$ ]  
 $c_{esq_3}$  – Comprimento de malha uniforme à esquerda da conduta 3 [ $m$ ]  
 $C_i$  – Comprimento da conduta  $i$  [ $m$ ]  
 $c_i$  – Comprimento de malha uniforme da conduta  $i$  [ $m$ ]  
 $Co$  – Número de *Courant* [–]  
 $D_{hid}$  – Diâmetro hidráulico [ $m$ ]  
 $E$  – Profundidade das condutas [ $m$ ]  
 $f$  – Coeficiente de *Darcy-Weisbach* [–]  
 $g_x, g_y, g_z$  – Componentes cartesianas da aceleração gravítica [ $m/s^2$ ]  
 $H_i$  – Altura da conduta  $i$  [ $m$ ]  
 $H'_3$  – Comprimento da secção de entrada da conduta 3 [ $m$ ]  
 $H''_3$  – Comprimento da região central [ $m$ ]  
 $K$  – Coeficiente de perda de carga total [–]  
 $K_{12}$  – Coeficiente de perda de carga parcial entre a conduta 1 e 2 [–]  
 $K_{13}$  – Coeficiente de perda de carga parcial entre a conduta 1 e 3 [–]  
 $N$  – Número de divisões (parede-a-parede) [–]  
 $n_\phi$  – Ordem de convergência do resultado  $\phi$  [–]  
 $p$  – Pressão [ $Pa$ ]  
 $Q$  – Caudal volúmico [ $m^3/s$ ]  
 $q$  – Caudal volúmico por metro de profundidade [ $(m^3/s)/m$ ]  
 $Re_{D_{hid}}$  – Número de *Reynolds* [–]  
 $t$  – Tempo [ $s$ ]  
 $u^i, v^i, w^i$  – Perfil de velocidade do escoamento da conduta  $i$  [ $m/s$ ]  
 $V^i$  – Velocidade axial média do escoamento da conduta  $i$  [ $m/s$ ]  
 $x, y, z$  – Referencial cartesiano global [ $m$ ]  
 $x_i, y_i, z$  – Referencial cartesiano local da conduta  $i$  [ $m$ ]  
 $x_{hr_i}, x_{hr_f}, x_{hr_T}$  – Início, fim e comprimento total da região de recirculação horizontal [ $m$ ]  
 $x_{vr_i}, x_{vr_f}, x_{vr_T}$  – Início, fim e comprimento total da região de recirculação vertical [ $m$ ]

## **Símbolos Gregos**

$\alpha$  – Coeficiente de energia cinética [–]

$\beta$  – Fração de caudal  $Q_2/Q_1$  [–]

$\Delta p$  – Perda de carga [Pa]

$\Delta p_{loc}$  – Perda de carga localizada total [Pa]

$\Delta p_{loc_{12}}$  – Perda de carga parcial entre a conduta 1 e 2 [Pa]

$\Delta p_{loc_{13}}$  – Perda de carga parcial entre a conduta 1 e 3 [Pa]

$\Delta t$  – Incremento de tempo [s]

$\Delta y$  – Comprimento característico da malha [m]

$\varepsilon_{\phi_{ext}}$  – Incerteza do resultado  $\phi$  [%]

$\theta$  – Ângulo de inclinação da conduta 3 [°]

$\mu$  – Viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s]

$\xi, \eta, \zeta$  – Referencial local [–]

$\rho$  – Massa volúmica do fluido [ $kg/m^3$ ]

$\phi_A, \phi_B, \phi_C$  – Extrapolação do resultado  $\phi$  [–]



# 1. Introdução e Objetivos

## 1.1. Enquadramento

Tem-se desenvolvido ao longo dos tempos um esforço contínuo para entender os fenómenos físicos associados à dinâmica do escoamento de líquidos e gases. Esse esforço culminou no século passado com as equações diferenciais da quantidade de movimento, denominadas como equações de Navier-Stokes em homenagem aos matemáticos e físicos Claude-Louis Navier e George Gabriel Stokes, tornando-se assim a principal base da ciência da Mecânica dos Fluidos.

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais que permitem determinar o campo de velocidades e pressão num escoamento. Aplicam-se em ambos os regimes de escoamento – laminar e turbulento – contudo, a oscilação das componentes de velocidade de um escoamento em regime turbulento tornam as soluções numéricas praticamente impossíveis, pelo que o seu uso acontece principalmente para escoamentos em regime laminar (1).

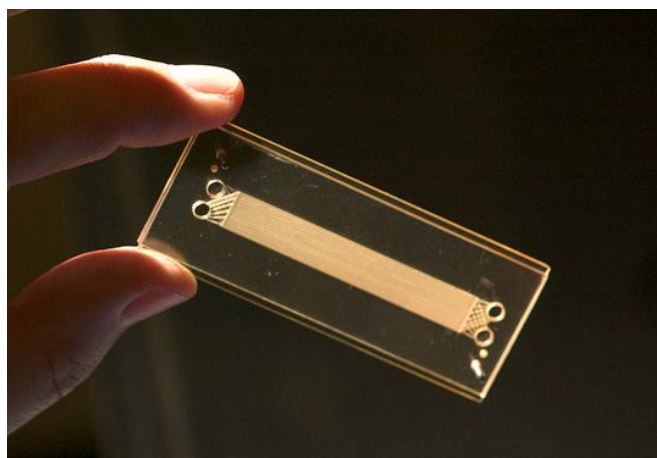


Figura 1 – Microreator para produção de biodiesel desenvolvido por Goran Jovanic – Oregon State University.

A maior parte das aplicações do nosso quotidiano que requerem o uso de condutas com bifurcação apresentam escoamentos desenvolvidos em regime turbulento, como por exemplo redes de distribuição de água, sistemas de ar condicionado e ventilações. Entretanto, o desenvolvimento de processos de fabrico que permitem trabalhar com dimensões reduzidas originou um crescimento de aparelhos nos quais o escoamento ocorre em regime laminar, e nos quais a introdução de canais com bifurcações é inevitável. Um exemplo desses aparelhos são os microreatores (Figura 1), conhecidos também por *lab-on-a-chip*. As suas aplicações decorrem principalmente em indústrias farmacêuticas ou na produção de biodiesel e hidrogénio (2). Problemas cardiovasculares, como trombooses e aterosclerose requerem também a necessidade de uma melhor compreensão do escoamento em regime laminar em condutas com bifurcação (3), embora nestes casos em condições de escoamento transiente.

## 1.2. Revisão Bibliográfica

Ao contrário do escoamento em regime laminar, para o escoamento em regime turbulento existem diversos estudos numéricos e experimentais do escoamento permanente em condutas com bifurcação. A maioria das investigações tem como foco o fenómeno de escoamento separado existente à entrada da conduta horizontal e da conduta vertical, sendo que há pouca informação sobre os coeficientes de perda de carga locais. O interesse nos coeficientes de transferência de calor tem no entanto motivado alguma investigação.

Liepsch *et al.* (4), levaram a cabo um estudo numérico e experimental do escoamento em regime laminar desenvolvido em condutas com bifurcação a  $90^\circ$  com o objetivo de avaliar a influência do número de *Reynolds* e da fração de caudal nos campos de velocidade e pressão e nas regiões de escoamento separado. Apesar de no estudo numérico a conduta ter sido simplificada a um caso bidimensional, os perfis de velocidade obtidos experimentalmente na vizinhança da bifurcação tridimensional através de um laser *Doppler* foram de um modo geral satisfatórios. O aumento do número de *Reynolds* mostrou aumentar o domínio das zonas de escoamento separado, sendo que o escoamento separado existente na conduta vertical apresenta um domínio superior ao escoamento separado que ocorre nas condutas horizontais.

Karino *et al.* (3), realizaram várias experiências em condutas com bifurcação e de secção circular utilizando modelos de vidro e artérias humanas com o objetivo de compreender e reduzir as regiões de escoamento separado. Os menores comprimentos de escoamento separado observados nas artérias mostraram que a geometria das artérias naturais é bastante melhor do que as próteses de órgãos existentes, pelo que as investigações futuras deverão focar-se com mais detalhe em artérias e veias naturais. A utilização de cantos arredondados na zona da bifurcação mostrou reduzir fortemente a região de escoamento separado vertical e aumentar ligeiramente a região de escoamento separado horizontal.

Lee *et al.* (5), realizaram um estudo numérico do escoamento desenvolvido em regime permanente e transiente numa conduta com bifurcação a  $90^\circ$  e numa aorta humana abdominal através do método de volumes finitos. Na conduta com bifurcação a  $90^\circ$  os resultados obtidos numericamente encontram-se de acordo com os obtidos previamente por via experimental. O estudo numérico revelou elevados gradientes de pressão juntos à bifurcação e gradientes adversos juntos às paredes onde ocorre separação do escoamento. Nas simulações do escoamento em regime transiente foram observadas diferenças significativas nos perfis de velocidade quando obtidos através de dois pulsos distintos mas de caudal médio igual, um realístico e outro sinusoidal.

Neary *et al.* (6), realizaram um estudo numérico com o objetivo de caracterizar as regiões de escoamento separado em regime laminar numa conduta com bifurcação a  $90^\circ$  e de secção retangular para diferentes números de *Reynolds* e frações de caudal. O estudo numérico revelou que para certos casos dinâmicos, a região de escoamento separado vertical existente encontra-se concentrada apenas no plano de simetria, e que a região de escoamento separado horizontal pode não ocorrer no plano de simetria e concentrar-se apenas junto às paredes laterais.

Miranda *et al.* (7), realizaram um estudo numérico do escoamento de dois fluidos distintos, um newtoniano e outro *Carreau*, em regime permanente e transiente, e desenvolvido em condutas com bifurcação a  $90^\circ$ . Ambas as recirculações aumentaram com

o número de *Reynolds*, e o efeito da fração de caudal apresentou um comportamento não monotónico. No escoamento transiente, o escoamento do fluido *Carreau* apresentou comprimentos de escoamento separado cerca de 10% maiores que os obtidos com o fluido newtoniano.

Xin *et al.* (8), realizaram um estudo numérico do escoamento desenvolvido em regime turbulento em condutas com diferentes tipos de bifurcação com o objetivo de diminuir os coeficientes de perda de carga. A utilização de uma conduta vertical com ângulos menores a 90° e com um arco à sua entrada revelou diminuir significativamente os coeficientes de perda de carga.

### 1.3 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo estudar o comportamento dinâmico do escoamento de um fluido newtoniano, incompressível e isotérmico em regime laminar e em regime permanente, numa conduta com bifurcação.

O interesse estará na obtenção dos coeficientes de perda de carga e caracterização das regiões de escoamento separado para diferentes números de *Reynolds* e frações de caudal  $\beta$ . A influência da alteração das grandezas geométricas adimensionais da conduta será também um objetivo de elevada importância.

## 2. Teoria

### 2.1. Regimes Laminar e Turbulento

O escoamento de um fluido numa conduta pode ser laminar ou turbulento. O escoamento diz-se em regime laminar quando as partículas de um fluido apresentam uma trajetória determinística, e em regime turbulento quando apresentam uma trajetória caótica.

A distinção entre ambos os escoamentos pode ser determinada através do número de *Reynolds* (1):

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.1)$$

onde  $\rho$  e  $\mu$  são, respetivamente, a massa volúmica e a viscosidade dinâmica do fluido,  $V$  é a velocidade média do escoamento e  $D$  é o diâmetro da conduta.

O número de *Reynolds* é uma medida da razão entre as forças viscosas e as forças de inércia de um escoamento. Números de *Reynolds* baixos ( $\ll 1$ ) apresentam escoamentos predominantemente conduzidos por forças viscosas, pelo que os efeitos da inércia são desprezáveis. Por outro lado, números de *Reynolds* elevados produzem escoamentos predominantemente conduzidos por forças de inércia (1).

A transição entre regime laminar e turbulento para escoamentos em condutas ocorre para números de *Reynolds* compreendidos entre 2100 e 4000 (1).

### 2.2. Perdas de Carga

As perdas de carga, ou de pressão, estão presentes em qualquer escoamento e dependem do regime de escoamento, laminar ou turbulento, das propriedades do fluido, da geometria da conduta e da própria natureza do material da conduta.

#### 2.2.1. Perdas de Carga em Linha

Numa conduta de secção constante, cujo escoamento se encontra desenvolvido, o gradiente de pressão  $\partial p / \partial x$ , é constante e negativo, pelo que o valor de perda de carga produzido é proporcional ao comprimento da conduta  $L$ . O valor de perda de carga produzido nestas circunstâncias designa-se como perda de carga em linha e calcula-se do seguinte modo (1):

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\Delta p}{L} = f \frac{\rho V^2}{2D_{hid}} \quad (2.2)$$

onde  $V$  representa a velocidade média do escoamento e a constante  $f$  representa o coeficiente adimensional de resistência de *Darcy – Weisbach*, ou coeficiente de fricção:

$$f = \frac{2D_{hid}}{\rho V^2} \left( -\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (2.3)$$

No caso de duas placas paralelas o valor de  $f$  calcula-se através da equação (2.4) e através da equação (2.5) (9) no caso de uma conduta de secção retangular de lados  $2e$  e  $2h$ .

$$f = \frac{96}{Re_{D_{hid}}} \quad (2.4)$$

$$f = \frac{6}{Re_{D_{hid}}} \left( \frac{D_{hid}}{h} \right)^2 \frac{1}{\left[ 1 - \frac{192h}{\pi^5 e} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\tanh\left(i\pi \frac{e}{2h}\right)}{i^5} \right]} \quad (2.5)$$

A constante  $D_{hid}$  representa o diâmetro hidráulico da conduta e calcula-se através da equação (2.6).

$$D_{hid} = 4 \frac{A}{P} = 4 \frac{he}{h + e} \quad (2.6)$$

No caso bidimensional a largura da conduta é de comprimento infinito, pelo que o diâmetro hidráulico é calculado do seguinte modo:

$$D_{hid} = \lim_{e \rightarrow \infty} 4 \frac{he}{h + e} = 4h \quad (2.7)$$

Nas equações (2.4) e (2.5), a constante  $Re_{D_{hid}}$  representa o número de *Reynolds* tendo como comprimento característico o diâmetro hidráulico da conduta:

$$Re_{D_{hid}} = \frac{\rho V D_{hid}}{\mu} \quad (2.8)$$

### 2.2.2. Perdas de Carga Localizadas

Qualquer alteração na secção da conduta induz no escoamento uma determinada perturbação, que será tanto mais agressiva, quanto mais agressiva for a alteração.

As perturbações introduzidas elevam a energia dissipada para além da energia dissipada do escoamento não perturbado, tornando-se ou não o fator principal de dissipação em função do comprimento da tubagem.

Como exemplos de situações que introduzem perturbações ao escoamento temos:

- Placas de orifício;
- Curvas;
- Bifurcações;
- Válvulas;
- Etc.

Dada a complexidade das equações que governam o escoamento nem sempre é possível quantificar analiticamente a perda de carga adicional devido a uma perturbação, e quando a via analítica não é suficiente existem apenas dois métodos de resolução – via experimental ou via computacional.

A resolução por via computacional não exclui a necessidade de recorrer à via experimental, pelo contrário, os resultados computacionais devem, sempre que possível, ser confirmados experimentalmente, sendo que na presente dissertação, a via experimental não será realizada.

Quer por via experimental, quer por via computacional, é necessário recorrer à equação de energia para escoamentos não uniformes de modo a contabilizar a energia dissipada devido à perturbação em causa.

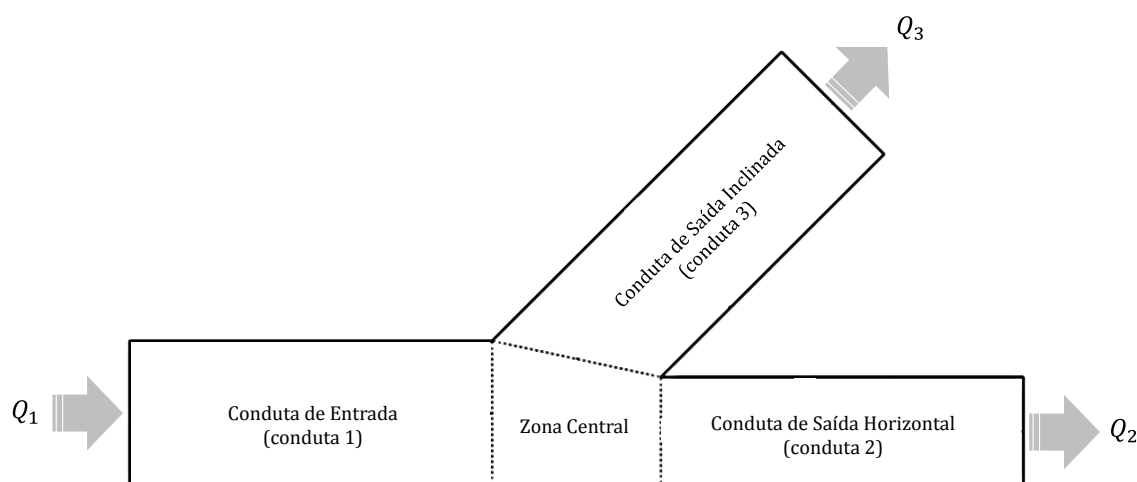


Figura 2 – Conduta com bifurcação.

O nosso caso trata-se de uma conduta horizontal com bifurcação (Figura 2), pelo que a equação de energia aplicada entre a conduta 1 e a conduta 2 assume a seguinte forma:

$$p_1 + \frac{1}{2}\alpha_1\rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\alpha_2\rho V_2^2 + f_1 \frac{L_1}{D_{hid_1}}\rho \frac{V_1^2}{2} + f_2 \frac{L_2}{D_{hid_2}}\rho \frac{V_2^2}{2} + \Delta p_{loc_{12}} \quad (2.9)$$

E entre a conduta 1 e a conduta 3:

$$p_1 + \frac{1}{2}\alpha_1\rho V_1^2 = p_3 + \frac{1}{2}\alpha_3\rho V_3^2 + f_1 \frac{L_1}{D_{hid_1}}\rho \frac{V_1^2}{2} + f_3 \frac{L_3}{D_{hid_3}}\rho \frac{V_3^2}{2} + \Delta p_{loc_{13}} \quad (2.10)$$

Resolvendo ambas as equações, (2.9) e (2.10), em função das perdas de carga localizadas  $\Delta p_{loc_{12}}$  e  $\Delta p_{loc_{13}}$ , temos:

$$\Delta p_{loc_{12}} = (p_1 - p_2) + \frac{1}{2}(\alpha_1\rho V_1^2 - \alpha_2\rho V_2^2) - \sum_i f_i \frac{L_i}{D_{hid_i}}\rho \frac{V_i^2}{2} \quad (2.11)$$

$$\Delta p_{loc_{13}} = (p_1 - p_2) + \frac{1}{2}(\alpha_1\rho V_1^2 - \alpha_3\rho V_3^2) - \sum_i f_i \frac{L_i}{D_{hid_i}}\rho \frac{V_i^2}{2} \quad (2.12)$$

Os coeficientes de perda de carga parciais e total são calculados do seguinte modo:

$$K_{12} = \frac{\Delta p_{loc_{12}}}{\frac{1}{2}\rho V_1^2} \quad (2.13)$$

$$K_{13} = \frac{\Delta p_{loc_{13}}}{\frac{1}{2}\rho V_1^2} \quad (2.14)$$

$$K = \beta K_{12} + (1 - \beta) K_{13} \quad (2.15)$$

onde a fração de caudal  $\beta$  corresponde à razão entre o caudal da conduta de saída horizontal (conduta 2) e o caudal da conduta de entrada (conduta 1) –  $Q_2/Q_1$ . A forma de cálculo apresentada nas equações (2.13) e (2.14) têm como referência a pressão dinâmica na secção de entrada.

O coeficiente adimensional  $\alpha$  introduzido na equação de energia denomina-se como coeficiente de energia cinética e tem como função corrigir o valor da energia cinética

quando calculado a partir da velocidade média do escoamento. A sua determinação dá-se através da equação (2.16) (1).

$$\alpha = \frac{\int_A \frac{1}{2} u^2 \rho V \cdot \hat{n} dA}{\frac{1}{2} \dot{m} V^2} \quad (2.16)$$

### 2.3. Separação do Escoamento

Normalmente o gradiente de pressões é negativo, ou seja, favorável ao escoamento, contudo devido à bifurcação é possível que ocorram gradientes de pressão adversos –  $\partial p / \partial x > 0$ . Gradientes de pressão adversos provocam um abrandamento no escoamento, e em certas circunstâncias pode inverter o sentido do escoamento, provocando separação do fluido junto à parede (Figura 3) (9).

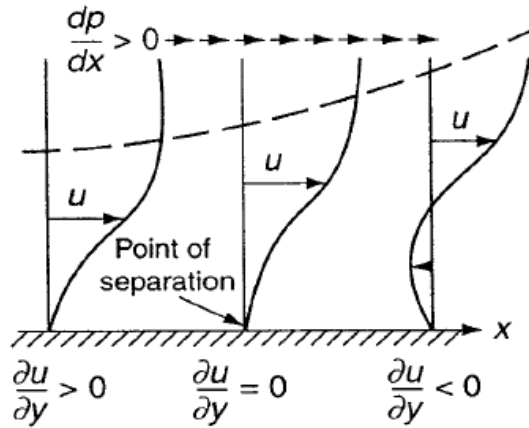


Figura 3 – Gradiente de pressão adverso e separação do escoamento (9).



### 3. Equações Governativas e Método Numérico

#### 3.1. Equações Governativas

##### 3.1.1. Princípio da Conservação da Massa

O princípio da conservação da massa para escoamentos de fluidos incompressíveis é descrito pela equação da continuidade (1):

$$\nabla V = 0 \quad (3.1)$$

onde  $t$  é o tempo,  $\rho$  é a massa volúmica e  $V$  é o campo de velocidade.

##### 3.1.2. Equação da Quantidade de Movimento

A evolução da quantidade de movimento é descrita pelas equações de *Navier – Stokes*, que são apresentadas nas equações (3.2), (3.3) e (3.4) para as três coordenadas cartesianas (1), e cujos termos

(direção  $x$ )

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

(direção  $y$ )

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.3)$$

(direção  $z$ )

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

#### 3.2. Método Numérico

##### 3.2.1. Dinâmica de Fluidos Computacional

O programa utilizado para análise computacional da dinâmica dos fluidos (*main.exe*), ou em inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD), utiliza o método numérico

de volumes finitos para a resolução das equações governativas. O código fonte do programa encontra-se em linguagem FORTRAN e foi desenvolvido pelo grupo de microfluídica e fluidos complexos do Centro de Estudos de Fenómenos de Transporte.

O programa implementa o algoritmo SIMPLEC (*SIMPLE Consistent*) de *Van Doormal* e *Raithby* (10), que segue praticamente os mesmos passos que o algoritmo SIMPLE de *Patankar* e *Spalding*. O algoritmo SIMPLE assegura o acoplamento entre pressões e velocidades, sendo que o algoritmo SIMPLEC manipula as equações do movimento de tal forma que a correção das equações de velocidade omitem termos menos significativos do que aqueles omitidos no algoritmo SIMPLE. O algoritmo SIMPLEC é mais eficiente do que o algoritmo SIMPLE, contudo não é fácil determinar qual é o melhor (10). A convergência foi assegurada através da norma  $L_2$  e foi definida como sendo  $1 \times 10^{-6}$ .

### 3.2.2. Esquema de Discretização

O esquema de discretização utilizado na resolução dos termos convectivos das equações de quantidade de movimento foi um misto de CDS (90 %) e UDS (10 %) nos casos tridimensionais e CDS nos casos bidimensionais.

- CDS (*Central Differencing Scheme*) – método de diferenças centradas de segunda ordem;
- UDS (*Upwind Differencing Scheme*) – método de montante de primeira ordem;

### 3.2.3. Geometria e Casos de Estudo

A forma geral da geometria em estudo encontra-se na Figura 4.

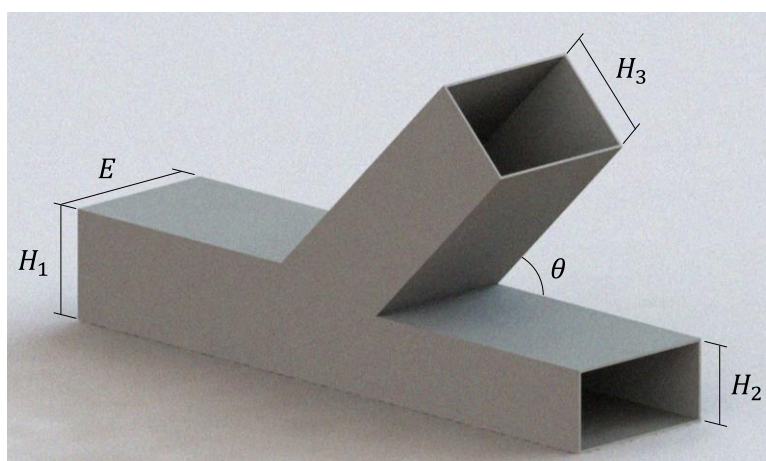


Figura 4 – Conduta de secção retangular com bifurcação e respetivas dimensões.

Ao nível dinâmico, o estudo numérico centrar-se-á em números de *Reynolds* entre 1 e 300, e frações de caudal  $\beta$  entre 0,1 e 0,9.

No estudo da influência das dimensões da conduta (Figura 4) considerar-se-á o caso base bidimensional de  $H_2/H_1 = 1$ ,  $H_3/H_1 = 1$ ,  $E/H_1 = \infty$  e  $\theta = 90^\circ$  e far-se-á variar isoladamente cada um dos parâmetros geométricos nos seguintes valores:

- $\theta = \{70^\circ; 80^\circ; 100^\circ; 110^\circ\}$ ;
- $H_2/H_1 = 0,75$ ;
- $H_3/H_1 = \{0,50; 0,75\}$ ;
- $E/H_1 = \{0,25; 0,50; 0,75; 1; 2\}$ .

A geometria dos diferentes casos de estudo encontra-se na Figura 5.

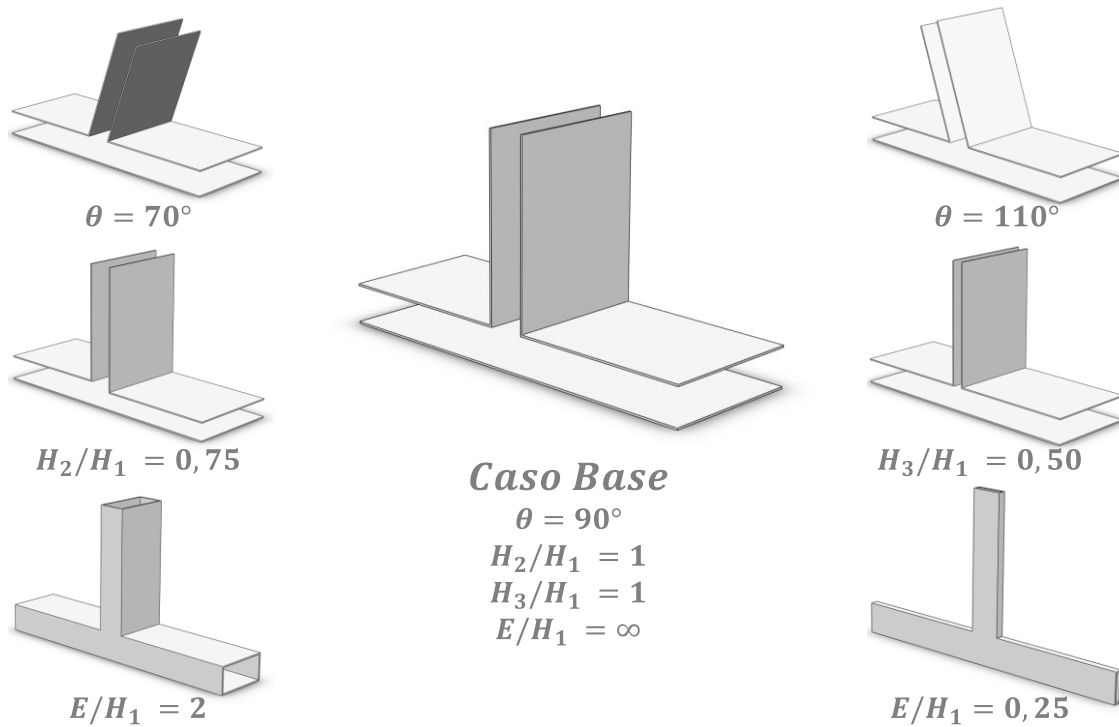


Figura 5 - Geometria dos casos de estudo.

### 3.2.4. Domínio de Cálculo

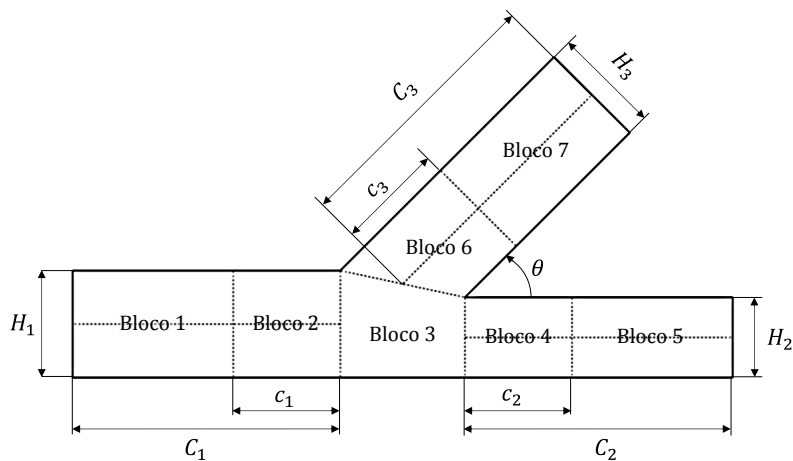


Figura 6 - Dimensões principais do domínio de cálculo e blocos para a geração da malha.

A geometria apresentada na Figura 6 é constituída por três condutas e uma região central, e encontra-se dividida em sete blocos:

- Os blocos 1 e 2 correspondem à conduta 1 (conduta de entrada);
- Os blocos 4 e 5 correspondem à conduta 2 (conduta de saída horizontal);
- Os blocos 6 e 7 correspondem à conduta 3 (conduta de saída inclinada);
- O bloco 3 corresponde à região central.

As dimensões principais correspondem às variáveis  $H_1, H_2, H_3, C_1, C_2, C_3, c_1, c_2, c_3$  e  $\theta$ . O comprimento do conjunto das condutas na direção normal ao plano de simetria é representado pela variável  $E$ .

Outras dimensões de interesse encontram-se na Figura 7.

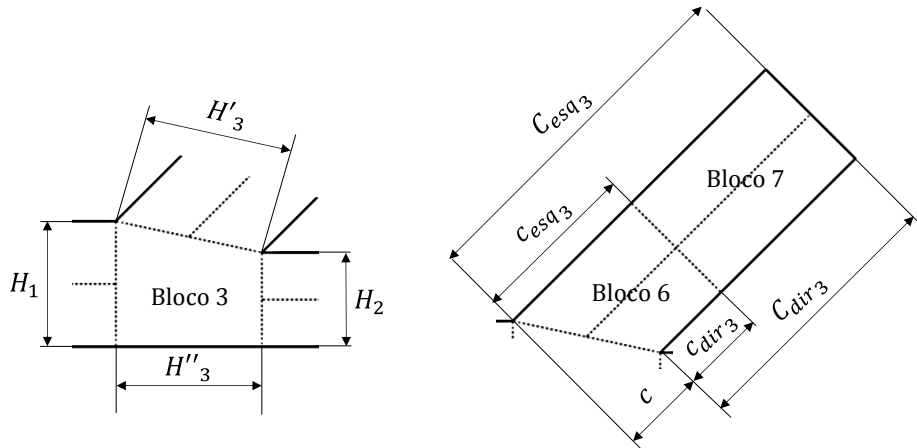


Figura 7 – Dimensões secundárias do domínio de cálculo.

$$H''_3 = \frac{H_3}{\sin \theta} + \frac{H_2 - H_1}{\tan \theta} \quad (3.5)$$

$$H'_3 = \sqrt{(H_1 - H_2)^2 + H''_3^2} \quad (3.6)$$

$$c = \frac{H_3}{\tan \theta} + \frac{H_2 - H_1}{\sin \theta} \quad (3.7)$$

$$C_{eq3} = C_3 + \frac{1}{2}c \quad (3.8)$$

$$C_{dir3} = C_3 - \frac{1}{2}c \quad (3.9)$$

$$c_{esq_3} = c_3 + \frac{1}{2}c \quad (3.10)$$

$$c_{dir_3} = c_3 - \frac{1}{2}c \quad (3.11)$$

A geometria utilizada em todos os casos de estudo apresenta em comum  $H_1 = 0,01$  [m]. Contudo, de modo a reduzir o tempo de cálculo numérico definiram-se dois domínios de cálculo, os quais apresentam comprimentos de conduta suficientes para um escoamento de número de *Reynolds* não superior a um determinado limite desenvolver perfeitamente (Tabela 1).

Tabela 1 – Domínios de cálculo

Domínio de Cálculo		$Re_{D_{hid}limite}$	$C$ [m] (*1)
Simulações Bidimensionais	(a)	60	0,200
$(E/H_1 = \infty)$	(b)	300	0,800
Simulações Tridimensionais	(a)	40	0,200
$(E/H_1 \neq \infty)$	(b)	150	0,600
(*1) $C_1 = C_2 = C_3 = C$			

### 3.2.5. Malha Computacional

Para a geração da malha foi desenvolvido um programa em linguagem FORTRAN (*geometria.exe*) com o objetivo de criar dois ficheiros (*mesh3D.dat* e *geometria.dat*) com a informação relativa às dimensões, número de divisões e condições de fronteira de cada bloco.

O ficheiro *mesh3D.dat* permite a outro programa (*mesh3D.exe*), também em linguagem FORTRAN e desenvolvido pelo grupo de microfluídica e fluidos complexos do Centro de Estudos de Fenómenos de Transporte, criar um outro ficheiro (*grdat*) que contém a informação relativa às dimensões, posição, vizinhança e condições de fronteira de cada volume finito.

A divisão dos blocos em volumes finitos requer o uso de um referencial local não ortogonal segundo as direções  $\xi$ ,  $\eta$  e  $\zeta$ , sendo o eixo correspondente à direção  $\zeta$  comum a todos os blocos e perpendicular ao plano de simetria da conduta (Figura 8).

Uma vez que o escoamento ao longo das condutas é unidirecional, salvo junto à região central, torna-se vantajosa a divisão de cada conduta em dois blocos – um de malha uniforme (volumes finitos de comprimento longitudinal igual ao comprimento transversal) e outro de malha não uniforme (volumes finitos de comprimento longitudinal superior ao comprimento transversal).

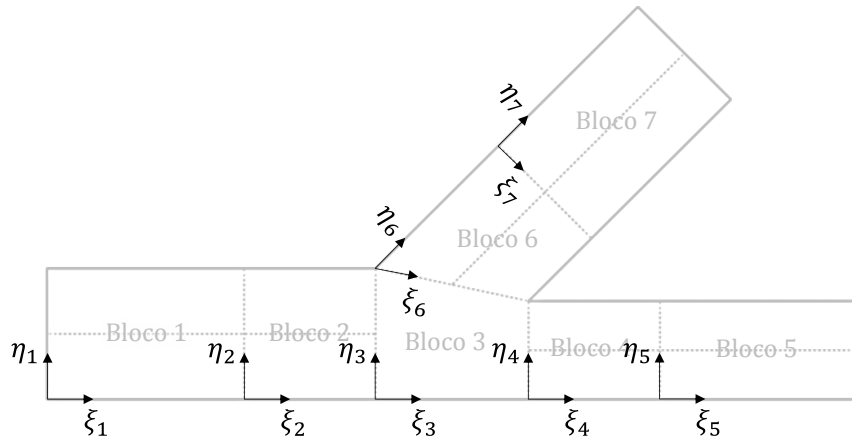


Figura 8 – Referencial local de cada bloco da malha computacional.

O comprimento longitudinal dos volumes finitos ao longo da conduta é descrito por uma progressão geométrica (sucessão matemática) de razão  $q$ :

$$q = \frac{\Delta x_{i+1}}{\Delta x_i} \quad (3.12)$$

Considerando o sentido do escoamento como sendo o sentido da progressão geométrica, temos que a razão geométrica  $q$  no bloco 1 deve ser  $\leq 1$ , e nos blocos 5 e 7  $\geq 1$ . Nos blocos de malha uniforme a razão geométrica  $q$  é 1.

O uso de blocos de malha não uniforme permite diminuir consideravelmente o número de volumes finitos da malha e assim reduzir o tempo de cálculo computacional. Note-se que razões geométricas  $\gg 1$  ou  $\ll 1$  introduzem variações bruscas no comprimento dos volumes finitos, o que se traduzirá em dificuldades de convergência e resultados menos precisos.

A divisão do volume de controlo nos respectivos volumes finitos de cada bloco ocorre pela definição da variável  $N$  – correspondente ao número de divisões parede-a-parede da conduta 1.

O comprimento característico da malha define-se como sendo:

$$\Delta y = \frac{H_1 + H_2}{2N} \quad (3.13)$$

O cálculo do número de divisões dos blocos segundo as direções  $\eta$  e  $\xi$  adjacente ao programa *geometria.exe* dá-se de acordo com a Tabela 2, e segundo o eixo  $\zeta$  dá-se de acordo com a seguinte equação:

$$N_{1,2,\dots,7}^{\zeta} = \begin{cases} 1 & \text{simulações bidimensionais} \\ \text{int} \left( \frac{E}{\Delta y} \right) & \text{simulações tridimensionais} \end{cases} \quad (3.14)$$

A configuração geral da malha computacional encontra-se na Figura 9.

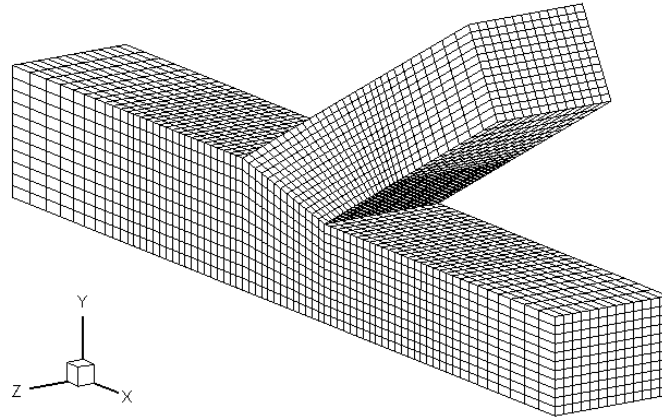


Figura 9 – Configuração geral da malha computacional

Tabela 2 – Número de divisões de cada bloco nas direções  $\xi$  e  $\zeta$

Bloco	Número de Divisões	
	$N_i^\xi$	$N_i^\eta$
1	$\text{int} \left( \frac{C_1 - c_1}{c_1} N_2^\xi \right) (q_1 = 1)$	$N$
	$\text{int} \left( 1 - \log_{q_1} \left( (1 - q_1) \frac{C_1 - c_1}{c_1} N_2^\xi + q_1 \right) \right) (q_1 < 1)$	
2	$\text{int} \left( \frac{c_1}{H_3''} N_3^\xi \right)$	$N$
3	$\text{int} \left( \frac{H_3''}{\Delta y} \right)$	$N$
4	$\text{int} \left( \frac{c_2}{H_3''} N_3^\xi \right)$	$N$
5	$\text{int} \left( \frac{C_2 - c_2}{c_2} N_4^\xi \right) (q_2 = 1)$	$N$
	$\text{int} \left( \log_{q_5} \left( (q_5 - 1) \frac{C_2 - c_2}{c_2} N_4^\xi + 1 \right) \right) (q_2 > 1)$	
6	$N_3^\xi$	$\text{int} \left( \frac{c_3}{\Delta y} \right)$
7	$N_3^\xi$	$\text{int} \left( \frac{C_3 - c_3}{c_3} N_6^\eta \right) (q_3 = 1)$
		$\text{int} \left( \log_{q_7} \left( (q_7 - 1) \frac{C_3 - c_3}{c_3} N_6^\eta + 1 \right) \right) (q_3 > 1)$

Para cada domínio de cálculo geraram-se três malhas de refinamento consecutivo – M1, M2 e M3. Os comprimentos dos blocos 1, 5 e 7 representam 50% do comprimento

total da respetiva conduta e as razões geométricas consideradas encontram-se na Tabela 3. O número de divisões na secção de entrada da conduta 1, bem como o número total de volumes finitos das malhas M1, M2 e M3 de cada caso de estudo encontram-se na Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 3 – Razões geométricas dos blocos 1, 5 e 7 das malhas M1, M2 e M3

		M1	M2	M3
Simulações Bidimensionais ( $E/H_1 = \infty$ )	$q_1$	0,960	0,980	0,990
	$q_2 = q_3$	1,042	1,020	1,010
Simulações Tridimensionais ( $E/H_1 \neq \infty$ )	$q_1$	0,922	0,960	0,980
	$q_2 = q_3$	1,086	1,042	1,020

Tabela 4 – Número de volumes finitos das malhas M1, M2 e M3 das simulações bidimensionais

Caso de Estudo	Malha	$N_1^\eta \times N_1^\zeta$	Volumes Finitos	
			(a)	(b)
Caso Base	M1	21X1	17199	58863
	M2	41X1	65846	225172
	M3	81X1	257256	879417
$\theta = 70^\circ$	M1	21X1	18025	61830
	M2	41X1	69246	236913
	M3	81X1	265311	906483
$\theta = 80^\circ$	M1	21X1	17031	58296
	M2	41X1	68120	233441
	M3	81X1	260697	891787
$\theta = 100^\circ$	M1	21X1	17031	58296
	M2	41X1	68120	233441
	M3	81X1	260697	891787
$\theta = 110^\circ$	M1	21X1	18025	65600
	M2	41X1	69246	236913
	M3	81X1	265311	906483
$H_2/H_1 = 0.75$	M1	21X1	20974	72600
	M2	41X1	77691	267819
	M3	81X1	303900	1050000
$H_3/H_1 = 0.50$	M1	21X1	14791	51105
	M2	41X1	55488	191354
	M3	81X1	214518	739099
$H_3/H_1 = 0.75$	M1	21X1	16828	57969
	M2	41X1	60462	207689
	M3	81X1	235482	808043



Tabela 5 – Número de volumes finitos das malhas M1, M2 e M3 das simulações tridimensionais

Caso de Estudo	Malha	$N_1^\eta \times N_1^\zeta$	Volumes Finitos	
			(a)	(b)
$E/H_1 = 2$	M1	5X11	11825	39050
	M2	11X23	118151	303347
	M3	21X43	811797	2081415
$E/H_1 = 1$	M1	7X7	14112	47236
	M2	15X15	137250	356400
	M3	29X29	999949	2588598
$E/H_1 = 0.75$	M1	7X5	10080	33740
	M2	15X11	100650	261360
	M3	31X23	898380	2330797
$E/H_1 = 0.50$	M1	9X5	16065	54675
	M2	19X9	128079	335844
	M3	37X19	1031301	2700926
$E/H_1 = 0.25$	M1	11X3	14025	48279
	M2	21X5	85995	226170
	M3	45X11	862290	2275515

### 3.2.6. Condições de Fronteira

#### Condição de Fronteira na Parede

Nas paredes da conduta considerou-se a condição de não escorregamento (10).

#### Condição de Fronteira na Entrada

Na secção de entrada (conduta 1) foi inserido como condição de entrada o perfil de velocidades teórico desenvolvido correspondente ao número de *Reynolds* em causa. Note-se contudo que a introdução do perfil de velocidades teórico desenvolvido requer uma observação mais detalhada. A introdução por si só do perfil teórico introduz um fluxo na secção de entrada superior ao desejado, afastando por isso os resultados da análise CFD do número de *Reynolds* pretendido.

O perfil teórico é um perfil contínuo e não uniforme, o que significa, que duas partículas por mais próximas que se encontrem não possuem a mesma velocidade. Este tipo de precisão é impossível introduzir em qualquer tipo de simulação CFD, em que o volume de controlo se encontra discretizado em vários volumes finitos, para os quais as suas propriedades são representadas pelo seu centróide.

Considere o seguinte caso:

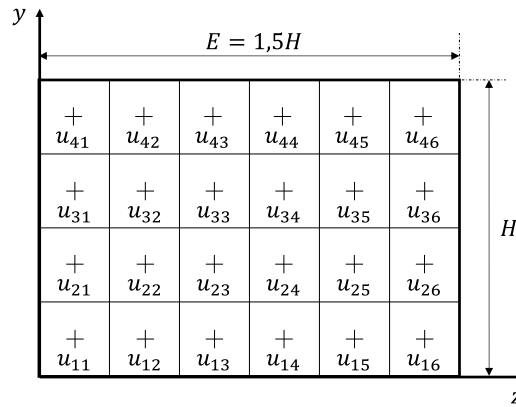


Figura 10 – Exemplo de secção transversal da conduta (6 × 4)

Adotando os seguintes valores de  $H = 0,01 [m]$  e de  $Re_{D_{hid}} = 100$  temos  $V_{teórico} = 8,333 \times 10^{-3} [m/s]$  e o seguinte perfil de velocidades teórico:

Tabela 6 – Velocidade de cada centróide

$u_{ij} \times 10^{-3} [m/s]$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$
$i = 1$	3,352	6,499	7,620	7,620	6,499	3,352
$i = 2$	6,239	13,202	15,858	15,858	13,202	6,239
$i = 3$	6,239	13,202	15,858	15,858	13,202	6,239
$i = 4$	3,352	6,499	7,620	7,620	6,499	3,352

Calculando a razão entre o somatório do fluxo que atravessa cada volume finito e o fluxo teórico que atravessa a secção através da seguinte equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^6 u_{ij} A_{ij}}{\bar{u}_{teórico} A_{total}} = 1,055 \quad (3.15)$$

Verificamos que o fluxo introduzido na simulação é 1,055 vezes superior (para a malha utilizada), pelo que se deve introduzir um perfil de velocidade adaptado.

De modo a respeitar o fluxo volumétrico que atravessa a secção de entrada correspondente ao número de *Reynolds* pretendido, adotou-se a seguinte equação de correção:

$$u_{teórico\ adaptado\ ij} = \frac{u_{teórico\ ij}}{r} \quad (3.16)$$

### 3.2.7. Solução Inicial

Como campo de velocidades inicial optou-se por se introduzir ao longo de todo o comprimento das condutas o respetivo perfil de velocidade teórico adaptado e como campo de pressões foi introduzido um campo nulo.

### 3.2.8. Número de Iterações

Apresenta-se na Tabela 7 a influência da introdução de um perfil uniforme e não uniforme como condição de entrada e solução inicial no número de iterações.

Tabela 7 – Influência das condições de entrada e solução inicial no número de iterações

Condição de Entrada	Solução Inicial	Número de Iterações				
		$u$	$v$	$p$	Total	Exteriores
Uniforme	Uniforme	802	861	110512	112175	278
Não Uniforme	Uniforme	798	860	109384	111042	278
(comparação com uniforme/uniforme)		-0,5%	-0,1%	-1,0%	-1,0%	+0,0%
Uniforme	Não Uniforme	862	839	86627	88328	269
(comparação com uniforme/uniforme)		+7,5%	-2,6%	-21,6%	-21,3%	-3,2%
Não Uniforme	Não Uniforme	877	844	84287	86008	269
(comparação com uniforme/uniforme)		+9,4%	-2,0%	-23,7%	-23,3%	-3,2%

A utilização de uma condição de entrada e solução inicial não uniforme – perfil teórico desenvolvido (adaptado), revelou uma diminuição de 23,3 % no somatório do número de iterações nas equações  $u$ ,  $v$  e  $p$ , e uma diminuição no número de iterações exteriores de 3,2 %. Assim sendo, de modo a reduzir o tempo de cálculo numérico optou-se por introduzir sempre como condição de entrada e solução iniciais perfis não uniformes.

### 3.2.9. Número de Courant

O número de *Courant* calcula-se a partir da seguinte equação:

$$Co = \frac{\Delta t}{\Delta y} V_{entrada} \quad (3.17)$$

Sendo que  $\Delta y$  representa o comprimento característico da malha,  $V_{entrada}$  representa a velocidade média de entrada e  $\Delta t$  representa o incremento de tempo utilizado na resolução das equações governativas.

O escoamento do presente estudo numérico ocorre em regime permanente, contudo a resolução das equações governativas utiliza o termo transiente, sendo que na solução convergida esse termo é praticamente nulo.

De modo a reduzir o tempo de cálculo numérico, efetuou-se um estudo preliminar sobre a influência do número de *Courant* no somatório do número de iterações nas equações  $u$ ,  $v$ ,  $w$  e  $p$  para diferentes números de *Reynolds* (entre 1 e 300) e frações de caudal  $\beta$  (entre 0,1 e 0,9).

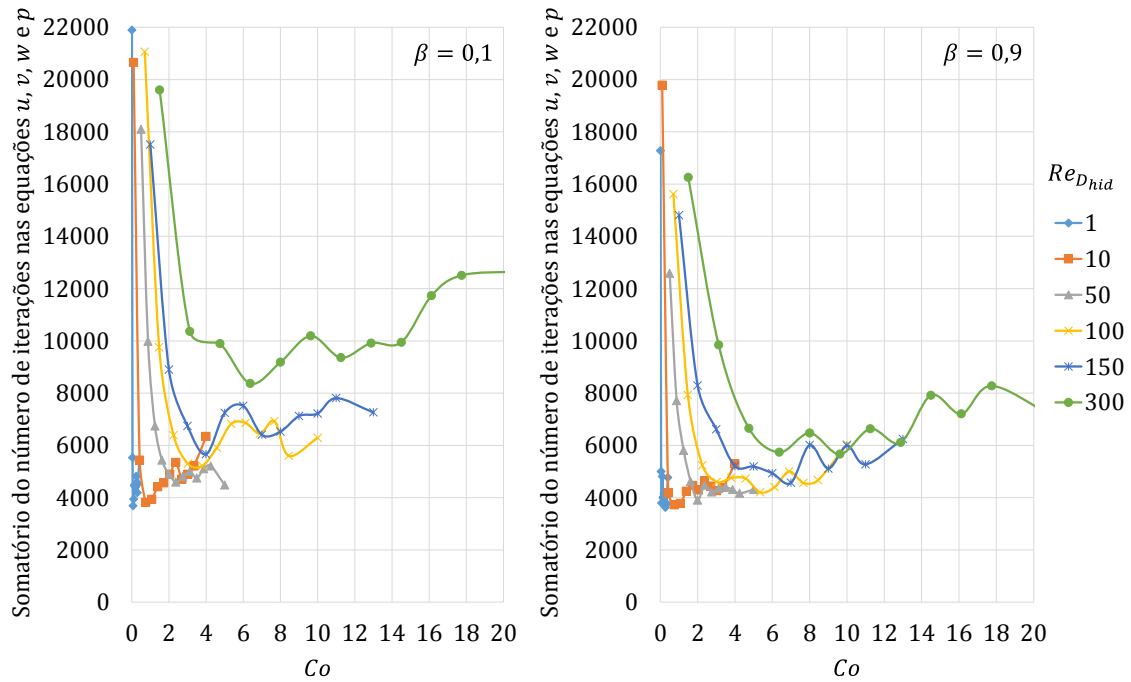


Figura 11 – Somatório do número de iterações nas equações  $u$ ,  $v$ ,  $w$  e  $p$  em função do número de *Courant* e *Reynolds* para frações de caudal  $\beta = 0,1$  e  $\beta = 0,9$  (domínio de cálculo do caso base e malha de  $N=11$ )

Como é possível constatar na Figura 11 existe um número de *Courant*, em função do número de *Reynolds* e da fração de caudal  $\beta$ , para o qual o somatório do número de iterações nas equações de velocidade e pressão é mínimo –  $Co_{\min}(Re_{D_{hid}}, \beta)$ .

Uma vez que  $Co_{\min}$  revelou-se praticamente independente da fração de caudal  $\beta$ , calculou-se para cada número de *Reynolds* a média aritmética do  $Co_{\min}$  obtido para as diferentes frações de caudal  $\beta$  testadas.

$$\overline{Co_{\min}}(Re_{D_{hid}}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Co_{\min}(Re_{D_{hid}}, \beta_i) \quad (3.18)$$

Os valores calculados a partir da equação (3.18) encontram-se apresentados na Tabela 8 e Figura 12.

Tabela 8 – Número de Courant para o qual o número de iterações é mínimo

$Re_{D_{hid}}$	$\overline{Co_{mín}}(Re_{D_{hid}})$
1	0,194
10	0,894
50	3,542
100	5,264
150	6,667
300	7,458

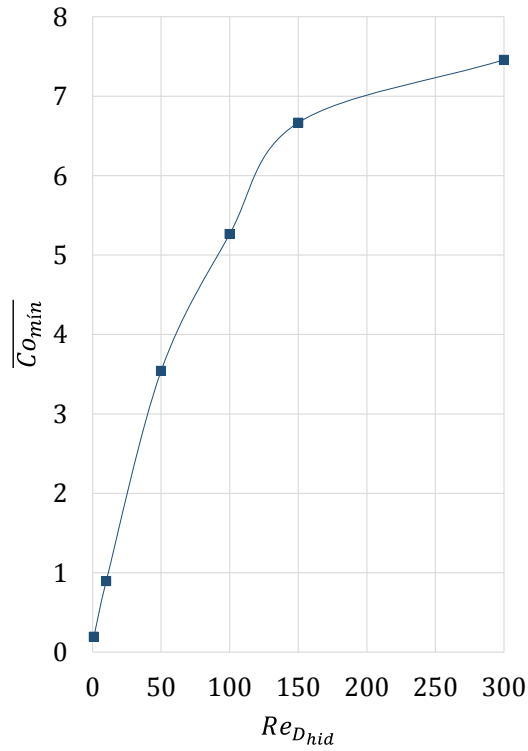


Figura 12 –  $\overline{Co_{mín}}$  em função do número de Reynolds

De modo a otimizar o tempo de simulação recorreu-se a  $\overline{Co_{mín}}(Re_{D_{hid}})$  para calcular o  $\Delta t$  utilizado nas futuras simulações (bidimensionais e tridimensionais):

$$\Delta t = \Delta y \frac{\overline{Co_{mín}}(Re_{D_{hid}})}{V_{entrada}} \quad (3.19)$$

Para números de *Reynolds* diferentes dos testados, calculou-se  $\overline{Co_{mín}}(Re_{D_{hid}})$  por interpolação linear.

## 4. Verificação do Método

A validação do método tem como objetivo verificar se o modelo numérico fornece soluções idênticas às soluções analíticas e flexíveis com o refinamento da malha utilizada.

Consideremos uma conduta de secção retangular em que o fluido escoar segundo a direção axial  $x$  com as seguintes dimensões:

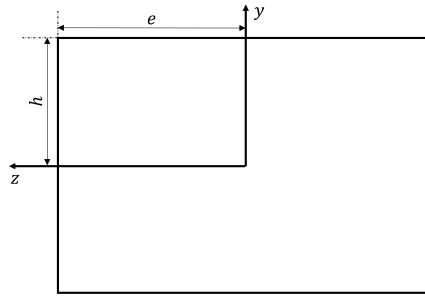


Figura 13 – Secção retangular de lados  $2e$  e  $2h$

Por se tratar de um escoamento de um fluido incompressível (massa volúmica constante) podemos escrever:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (4.1)$$

Como  $v = 0$  e  $w = 0$ , a equação da continuidade (3.1) fica:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (4.2)$$

Por se tratar de um escoamento em regime permanente temos:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial t} = 0 \quad (4.3)$$

Simplificando as equações de *Navier – Stokes* (3.2), (3.3) e (3.4) de acordo com as propriedades do escoamento temos:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4.4)$$

No caso bidimensional a largura da conduta é de comprimento infinito, pelo que podemos escrever:

$$\lim_{e \rightarrow \infty} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (4.5)$$

Introduzindo a equação (4.5) nas equações de *Navier – Stokes* (4.4) temos:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4.6)$$

Aplicando a condição de não escorregamento junto à parede, é possível obter a equação do perfil de velocidade ( $-h \leq y \leq h$ ) (9):

$$u(y) = \frac{3}{2} V \left[ 1 - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right] \quad (4.7)$$

No caso tridimensional a solução analítica do perfil de velocidades torna-se mais complexa, sendo necessário recorrer a séries de expansão ( $-h \leq y \leq h \wedge -e \leq z \leq e$ ) (9):

$$u(y, z) = \frac{48V}{\pi^3} \frac{\sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} (-1)^{\frac{i-1}{2}} \left[ 1 - \frac{\cosh\left(i\pi \frac{z}{2h}\right)}{\cosh\left(i\pi \frac{e}{2h}\right)} \right] \cos\left(i\pi \frac{y}{2h}\right)}{\left[ 1 - \frac{192h}{\pi^5 e} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\tanh\left(i\pi \frac{e}{2h}\right)}{i^5} \right]} \quad (4.8)$$

De modo a ser possível comparar os resultados numéricos com resultados analíticos recorreu-se ao caso de duas placas paralelas, cujas soluções analíticas para o perfil de velocidades e coeficiente de *Darcy – Weisbach* são conhecidas e encontram-se apresentadas na secção 3.3.

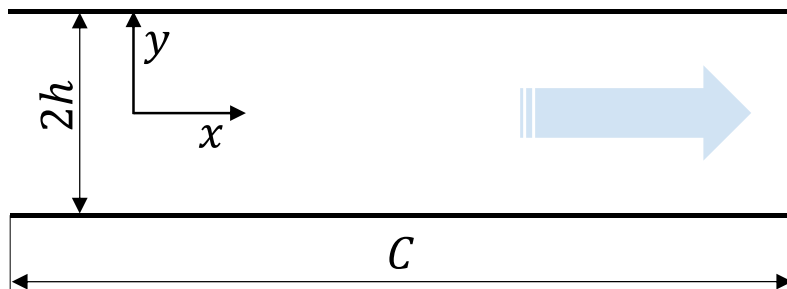


Figura 14 – Escoamento entre duas placas paralelas

De acordo com a Figura 14 e com as seguintes dimensões:

- $h = 0,005 [m]$ ;
- $C = 0,100 [m]$ .

geraram-se três malhas de refinamento consecutivo com os seguintes números de divisões verticais –  $N$ :

- Malha 1:  $N = 21$ ;
- Malha 2:  $N = 41$ ;
- Malha 3:  $N = 81$ .

De seguida, atribuiu-se a velocidade média de escoamento correspondente a  $Re_{D_{hid}} = 1$ , que de acordo com a geometria presente corresponde a  $V = 0,00005 [m/s]$ , cujo coeficiente de *Darcy – Weisbach* teórico associado é  $f = 96$ .

Os perfis de velocidade obtidos a partir da análise computacional, bem como o perfil teórico encontram-se na Figura 15.

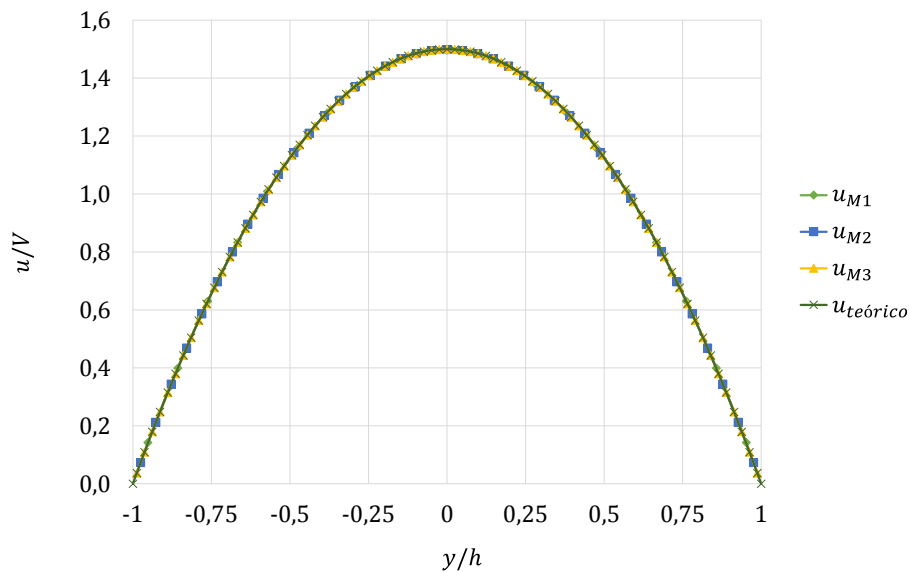


Figura 15 – Perfil de velocidade  $u$  teórico e das malhas M1, M2 e M3 para um escoamento entre placas paralelas de  $h = 0,005 [m]$

Na Figura 15 é possível constatar que as soluções numéricas se encontram dentro do esperado, sendo que o erro relativo médio do perfil de velocidades –  $u_{mer}$  – e o respetivo erro relativo do coeficiente de *Darcy* –  $f_{er}$  – encontram-se na Tabela 9.



*Tabela 9 – Erros associados às malhas M1, M2 e M3*

$\Delta y [m]$	$u_{mer}$	$f_{er}$
0,000476	0,001451	0,004616
0,000244	0,000404	0,001388
0,000123	0,000107	0,000555

De acordo com a Tabela 9 é possível concluir que a precisão das soluções é fortemente afetada com o nível de refinamento da malha, sendo a Malha 3 a que oferece soluções mais próximas das teóricas.

## 5. Método de Processamento de Dados

### 5.1. Algoritmo

Devido ao elevado número de simulações e ao tempo reduzido para a realização da dissertação desenvolveu-se um algoritmo em linguagem FORTRAN com o objetivo de tratar os resultados de forma automática e redigir um relatório onde é possível conferir quer os resultados de interesse, quer um conjunto de parâmetros que têm como função fornecer informações sobre a precisão da simulação.

Para tal foi necessário criar um conjunto de matrizes onde são armazenados os resultados de pressão e velocidade de cada conduta resultantes da análise CFD:

- $p^i(x_i, y_i, z)$ ;
- $u^i(x_i, y_i, z)$ ;
- $v^i(x_i, y_i, z)$ ;
- $w^i(x_i, y_i, z)$ .

Sendo que as velocidades  $u^3(x_3, y_3, z)$  e  $v^3(x_3, y_3, z)$  dizem respeito as velocidades axiais e transversais da conduta 3 (Figura 16).

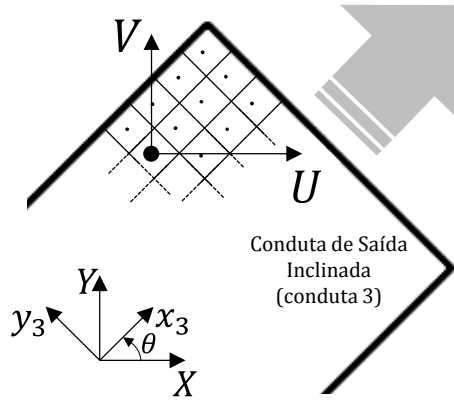


Figura 16 – Mudança de referencial da conduta 3.

A mudança de referencial dá-se por aplicação das seguintes equações:

$$u^3 = U \times \cos \theta + V \times \sin \theta \quad (5.1)$$

$$v^3 = -U \times \sin \theta + V \times \cos \theta \quad (5.2)$$

De seguida, o algoritmo cria um conjunto de dados (Tabela 10) tendo em conta que as malhas geradas em todos de estudo são uniformes na secção transversal de todas condutas.

Tabela 10 – Matrizes de armazenamento de dados e respetiva descrição

Matriz	Definição
$\bar{p}^i(x_i)$	Média aritmética da pressão da conduta $i$ em função de $x_i$ : $\frac{1}{N_i^z \times N_i^{y_i}} \sum_{z=0}^E \sum_{y_i=0}^{H_i} p^i(x_i, y_i, z)$
$\left  \frac{\partial p^i}{\partial x}(x_i) \right $	Módulo do gradiente de pressão da conduta $i$ em função de $x_i$ : $\left  \frac{\bar{p}^i(x_i) - \bar{p}^i(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \right $
$p_{dsr}^i(x_i)$	Desvio relativo do perfil de pressão da conduta $i$ em função de $x_i$ : $\frac{1}{N_i^z \times N_i^{y_i}} \sum_{z=0}^E \sum_{y_i=0}^{H_i} \left  \frac{p^i(x_i, y_i, z) - \bar{p}^i(x_i)}{\bar{p}^i(x_i)} \right $
$u_{mer}^i(x_i)$	Média aritmética do erro relativo do perfil de velocidade $u^i$ da conduta $i$ em função de $x_i$ (*1): $\frac{1}{N_i^z \times N_i^{y_i}} \sum_{z=0}^E \sum_{y_i=0}^{H_i} \left  \frac{u^i(x_i, y_i, z) - u_{teo}^i(y_i, z)}{u_{teo}^i(y_i, z)} \right $
$v_{méd}^i(x_i)$	Média aritmética do módulo do perfil de velocidade $v^i/V^i$ da conduta $i$ em função de $x_i$ : $\frac{1}{N_i^z \times N_i^{y_i}} \sum_{z=0}^E \sum_{y_i=0}^{H_i} \left  \frac{v^i(x_i, y_i, z)}{V_i} \right $
$w_{méd}^i(x_i)$	Média aritmética do módulo do perfil de velocidade $w^i/V^i$ da conduta $i$ em função de $x_i$ : $\frac{1}{N_i^z \times N_i^{y_i}} \sum_{z=0}^E \sum_{y_i=0}^{H_i} \left  \frac{w^i(x_i, y_i, z)}{V_i} \right $

### 5.1.1. Critério de Desenvolvimento

De modo a contabilizar corretamente a energia dissipada devido à bifurcação é necessário que as secções definidas na equação de energia sejam secções onde o escoamento se encontra completamente desenvolvido.

Na conduta 1, o escoamento inicia-se como escoamento não desenvolvido devido à perturbação introduzida pela entrada e tende a evoluir para um estado desenvolvido à medida que avança na conduta. Porém, devido à bifurcação que se encontra a sua jusante, o escoamento deixa de se comportar como escoamento desenvolvido ainda na

conduta 1, e entra nas condutas 2 e 3 como escoamento não desenvolvido. À medida que avança nas condutas 2 e 3, ambos os escoamentos tendem a evoluir para um estado desenvolvido e a permanecerem praticamente inalteráveis até às respectivas secções de saída.

Devido ao elevado número de simulações surgiu a necessidade de desenvolver um algoritmo para determinar as regiões de escoamento desenvolvido de cada conduta de um modo sistemático e controlável.

O algoritmo responsável por determinar o início e o fim da região de escoamento desenvolvido de cada conduta tem como princípio o facto de ao longo de uma região desenvolvida o perfil de pressão de uma secção ortogonal às paredes da conduta ser uniforme e as velocidades transversais serem nulas.

O pressuposto anterior permitirá então o algoritmo definir duas secções consideradas de escoamento desenvolvido em ambas as extremidades de cada conduta através da aplicação simultânea das seguintes condições:

- $p_{mer}^i(x_i) \leq p_{mer_{máx}}$ ;
- $v_{méd}^i(x_i) \leq v_{méd_{máx}}$ ;
- $w_{méd}^i(x_i) \leq w_{méd_{máx}}$ .

Como critério consideraram-se  $p_{mer_{máx}} = 1 \times 10^{-9}$  e  $v_{méd_{máx}} = w_{méd_{máx}} = 1 \times 10^{-6}$ . Note-se que quanto maior os parâmetros de tolerância  $p_{mer_{máx}}$ ,  $v_{méd_{máx}}$  e  $w_{méd_{máx}}$ , maior a região de escoamento considerado desenvolvido contudo, tornar-se-á mais provável que as secções de início e fim do escoamento considerado desenvolvido não sejam na verdade secções desenvolvidas. De modo a diminuir a probabilidade de o algoritmo definir secções de escoamento não desenvolvido para o cálculo dos coeficientes de perda de carga, o mesmo define uma terceira secção em cada conduta situada na posição intermédia das duas secções estabelecidas anteriormente, e considera-a igualmente como uma secção de escoamento desenvolvido (Figura 17).

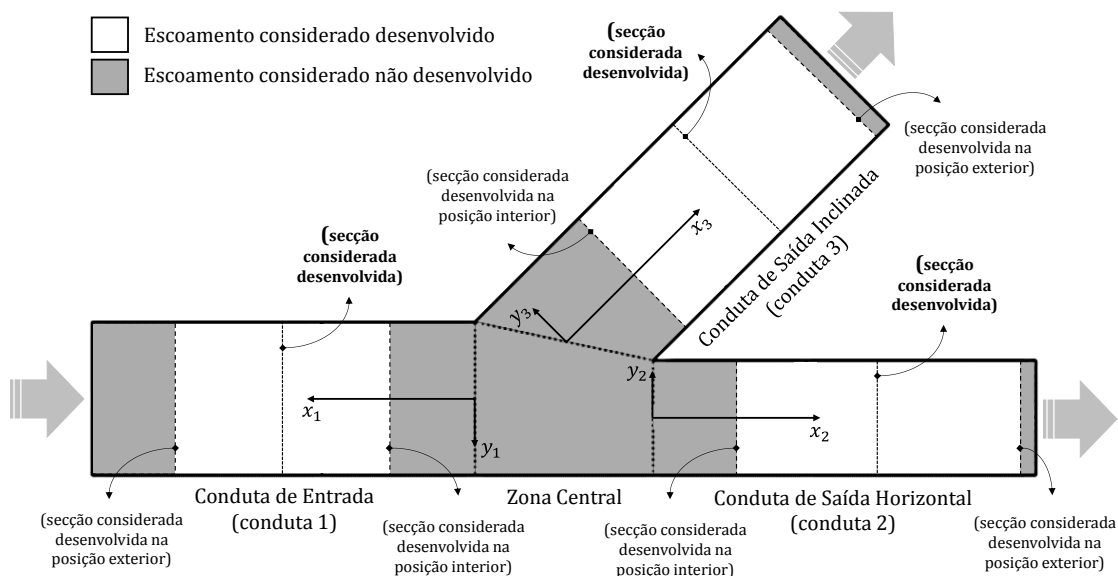


Figura 17 – Regiões de escoamento desenvolvido e referencial de cada conduta.

Como se pode visualizar na Figura 9 (3.2.5), a ortogonalidade dos volumes finitos do bloco 6 é fortemente afetada pela variação dos parâmetros geométricos  $\theta$  e  $H_2$ , pelo que se optou por definir as secções consideradas desenvolvidas da conduta 3 no bloco 7, eliminado assim a necessidade de interpolar valores de pressão e de velocidade.

### 5.1.2. Cálculo dos Coeficientes de Perda de Carga

Num primeiro passo, o algoritmo calcula os coeficientes de perda de carga utilizando as secções de posição intermédia da região de escoamento considerado desenvolvido de cada conduta. Contudo, existem variações no gradiente de pressão e no perfil de velocidade em secções consecutivas pertencentes a regiões onde o escoamento é considerado desenvolvido. Razão pela qual o algoritmo repete o processo de cálculo dos coeficientes de perda de carga utilizando as secções que antecedem e precedem as secções de posição intermédia e calcula a respetiva média aritmética dos coeficientes de perda de carga.

A obtenção dos coeficientes de perda de carga requer o cálculo *a priori* do coeficiente adimensional de resistência e do coeficiente de energia cinética através das equações (2.3) e (2.16), sendo que o gradiente de pressão  $\partial p / \partial x$  e o perfil de velocidade  $u$  de cada secção utilizados nas equações anteriores correspondem aos verificados na simulação. Os comprimentos utilizados no cálculo da perda de carga em linha correspondem as posições  $x_i$  das diferentes secções consideradas de escoamento desenvolvido (Figura 17).

### 5.1.3. Cálculo dos Comprimentos de Escoamento Separado

A separação do escoamento ocorre junto à parede inferior da conduta 1 e junto à parede esquerda da conduta 3 (Figura 18).

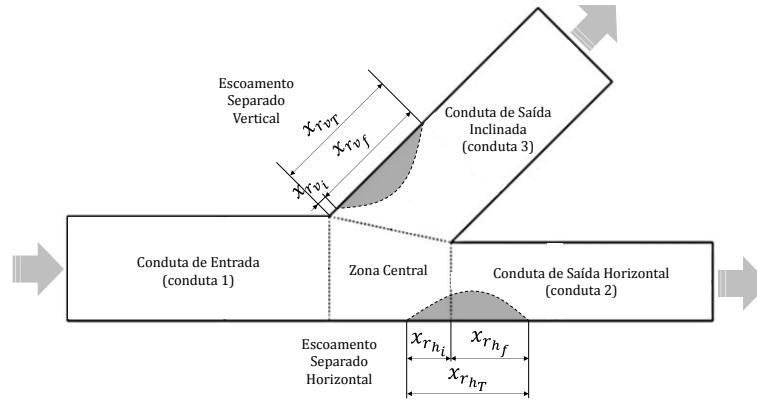


Figura 18 – Regiões de escoamento separado vertical e horizontal.

As variáveis  $x_{h_{r_i}}$ ,  $x_{h_{r_f}}$  e  $x_{h_{r_T}}$  indicam a posição de escoamento separado horizontal (junto à parede horizontal inferior) e correspondem, respetivamente, ao início, fim e comprimento total de escoamento separado. As variáveis  $x_{v_{r_i}}$ ,  $x_{v_{r_f}}$  e  $x_{v_{r_T}}$  indicam a posição de escoamento separado vertical (junto à parede esquerda da conduta 3) e correspondem, respetivamente, ao início, fim e comprimento total de escoamento separado.

As posições de início e fim da região horizontal e vertical de escoamento separado são obtidas através do cálculo da raiz quadrada do polinómio de segundo grau que contém as coordenadas  $(x_{wall}, u_{wall})$  dos pontos A, B e C (Figura 19). As velocidades  $u_{wall}$  correspondem às velocidades  $u_i$  dos volumes finitos juntos à parede onde se verifica o início e o fim da região de escoamento separado.

No caso da conduta 3, os pontos A, B e C são obtidos por intersecção da reta que contém os centróides de uma única secção com o eixo  $Ox_{wall}$ .

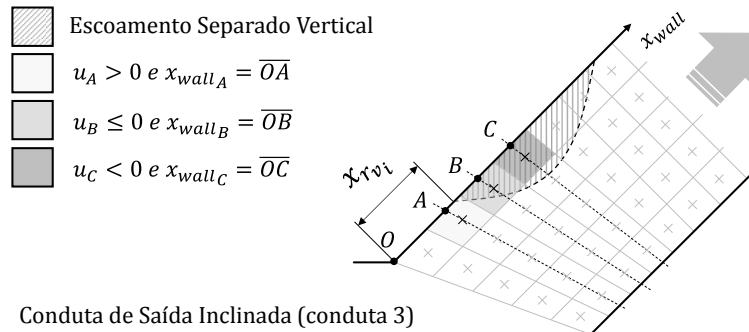


Figura 19 – Determinação do início da região de escoamento separado vertical.

## 5.2. Análise de Incerteza

Com o objetivo de avaliar a exatidão dos resultados efetuou-se uma análise de incerteza nos casos dinâmicos limites dos domínios de cálculo tendo por base a técnica de extrapolação de *Richardson*.

Optou-se por utilizar três malhas com refinamento consecutivo e consistente – Malha 1, Malha 2 e Malha 3, sendo que a Malha 1 representa a malha mais grosseira, a Malha 2 representa a malha intermédia e a Malha 3 representa a malha mais refinada. No caso das simulações bidimensionais, a malha principal foi a Malha 2, e nas simulações tridimensionais foi a Malha 3.

A técnica de extrapolação de *Richardson* consiste numa primeira fase verificar qual a ordem de convergência dos resultados  $\phi$  face ao refinamento através da seguinte equação:

$$n_\phi = \log_2 \frac{\phi_{Malha_3} - \phi_{Malha_2}}{\phi_{Malha_2} - \phi_{Malha_1}} \quad (5.3)$$

De seguida segue-se o processo de extrapolação de resultados:

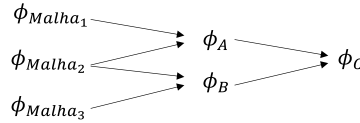


Figura 20 – Esquema de extrapolação de Richardson.

$$\phi_A = \frac{2^{n_\phi} \phi_{Malha_2} - \phi_{Malha_1}}{2^{n_\phi} - 1} \quad (5.4)$$

$$\phi_B = \frac{2^{n_\phi} \phi_{Malha_3} - \phi_{Malha_2}}{2^{n_\phi} - 1} \quad (5.5)$$

$$\phi_C = \frac{2^{n_\phi+1} \phi_B - \phi_A}{2^{n_\phi+1} - 1} \quad (5.6)$$

Sendo que  $\phi_A$  e  $\phi_B$  representam valores extrapolados com uma de ordem  $n_\phi + 1$  e  $\phi_C$  de ordem  $n_\phi + 2$ .

A partir de  $\phi_C$  é possível apresentar a incerteza associada às malha principais:

$$\varepsilon_{\phi_{ext}} = \left| \frac{\phi_C - \phi_{Malha\ Principal}}{\phi_C} \right| \quad (5.7)$$

## 6. Apresentação e Discussão de Resultados

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos comprimentos (adimensionais) de escoamento separado e coeficientes de perda de carga obtidos para os diferentes parâmetros de estudo, bem como as respectivas incertezas associadas.

Na Tabela 11 e na Tabela 12 são apresentadas respectivamente as incertezas associadas aos comprimentos de escoamento separado vertical e horizontal. O valor de incerteza associado aos resultados de posição de início de ambos os escoamentos separados é elevado, e o valor de incerteza associada aos comprimentos totais de escoamento separado verificou-se maior com o aumento de  $\theta$  e com a redução de  $H_2/H_1$  ou de  $H_3/H_1$ . As simulações tridimensionais apresentam também incertezas associadas elevadas, e são tanto maiores quanto menor a profundidade.

Várias justificações possíveis foram encontradas para os elevados valores de incerteza associada, entre elas encontram-se o nível de refinamento insuficiente, o método de determinação da posição de início e fim do escoamento separado e a introdução de elementos não ortogonais na malha computacional.

*Tabela 11 – Incerteza associada aos comprimentos de escoamento separado vertical*

	$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{v_i}}$	$x_{r_{v_f}}$	$x_{r_{v_T}}$
Caso Base	60	0,1	16,78% <sup>(2)</sup>	4,93% <sup>(1)</sup>	10,98%
	300		264,51%	0,40% <sup>(2)</sup>	1,16%
$\theta = 70^\circ$	60	0,4	21,04% <sup>(1)</sup>	2,65%	10,64%
	300	0,1	148,71%	0,88%	2,15%
$\theta = 110^\circ$	60	0,1	212,24% <sup>(1)</sup>	414,47% <sup>(1)</sup>	307,45% <sup>(1)</sup>
	300		203,43% <sup>(1)</sup>	76,23% <sup>(1)</sup>	75,98% <sup>(1)</sup>
$H_2/H_1 = 0,75$	60	0,1	20,37% <sup>(2)</sup>	3,74% <sup>(1)</sup>	11,41%
	300		324,44%	0,61%	1,37%
$H_3/H_1 = 0,50$	60	0,9	236,65%	0,05% <sup>(1)</sup>	21,97%
	300	0,1	496,96%	0,79% <sup>(1)</sup>	2,76% <sup>(2)</sup>
$E/H_1 = 2$	60	0,1	299,25% <sup>(1)</sup>	2,96% <sup>(1)</sup>	19,79% <sup>(1)</sup>
	150		1318,09% <sup>(1)</sup>	6,19% <sup>(1)</sup>	8,53% <sup>(1)</sup>
$E/H_1 = 0,25$	60	0,1	50,00% <sup>(1)</sup>	50,00% <sup>(1)</sup>	50,00% <sup>(1)</sup>
	150		722,32% <sup>(1)</sup>	5,07% <sup>(1)</sup>	8,79% <sup>(1)</sup>

Análise de incerteza efetuada pelo método de extrapolação de *Richardson* e através de três malhas de refinamento consecutivo. A ordem de convergência verificada foi de primeira ordem, exceto nos casos:

- (1) Não se verificou convergência entre as três malhas, pelo que se considerou primeira ordem de convergência e utilizou-se as duas malhas mais refinadas para o cálculo da incerteza associada;
- (2) Ordem de convergência de segundo grau.



Tabela 12 – Incerteza associada aos comprimentos de escoamento separado vertical

	$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{h_i}}$	$x_{r_{h_f}}$	$x_{r_{h_T}}$
Caso Base	60	0,1	1,61% <sup>(2)</sup>	0,48% <sup>(2)</sup>	1,04% <sup>(2)</sup>
	300		0,40%	0,27%	0,01% <sup>(1)</sup>
$\theta = 70^\circ$	60	0,1	1,62% <sup>(2)</sup>	0,67% <sup>(2)</sup>	1,10% <sup>(2)</sup>
	300		0,45%	0,18% <sup>(2)</sup>	0,03% <sup>(1)</sup>
$\theta = 110^\circ$	60	0,1	165,29% <sup>(1)</sup>	312,17% <sup>(1)</sup>	1584,07% <sup>(1)</sup>
	300		137,56% <sup>(1)</sup>	0,94%	62,55% <sup>(1)</sup>
$H_2/H_1 = 0,75$	300	0,1	0,68%	1,14%	0,08%
$H_3/H_1 = 0,50$	60	0,1	16,75% <sup>(2)</sup>	0,12% <sup>(2)</sup>	0,97% <sup>(2)</sup>
	300		0,44%	0,05% <sup>(2)</sup>	0,17%
$E/H_1 = 2$	60	0,1	1000,97% <sup>(1)</sup>	0,90% <sup>(1)</sup>	3,18% <sup>(1)</sup>
	150		2,80% <sup>(1)</sup>	2,77% <sup>(1)</sup>	2,75% <sup>(1)</sup>
$E/H_1 = 0,25$	150	0,1	15,24% <sup>(1)</sup>	458,53% <sup>(1)</sup>	78,37% <sup>(1)</sup>

Análise de incerteza efetuada pelo método de extrapolação de *Richardson* e através de três malhas de refinamento consecutivo. A ordem de convergência verificada foi de primeira ordem, exceto nos casos:

- (1) Não se verificou convergência entre as três malhas, pelo que se considerou primeira ordem de convergência e utilizou-se as duas malhas mais refinadas para o cálculo da incerteza associada;  
 (2) Ordem de convergência de segundo grau.

Os valores de incerteza associada aos coeficientes de perda de carga encontram-se na Tabela 13. De um modo geral as simulações bidimensionais apresentam incertezas associadas inferiores a 3% e as simulações tridimensionais inferiores a 10%.

Tabela 13 – Incerteza associada aos coeficientes de perda de carga

	$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K$
Caso Base	60	0,1	0,78%	1,53%	1,49%
	300		0,00% <sup>(1)</sup>	0,15% <sup>(1)</sup>	0,13% <sup>(1)</sup>
$\theta = 70^\circ$	60	0,1	0,71%	1,38%	1,33%
	300		0,01% <sup>(1)</sup>	0,56% <sup>(1)</sup>	0,46% <sup>(1)</sup>
$\theta = 110^\circ$	60	0,1	0,82%	0,70% <sup>(1)</sup>	0,70% <sup>(1)</sup>
	300		0,01% <sup>(1)</sup>	0,16% <sup>(1)</sup>	0,15% <sup>(1)</sup>
$H_2/H_1 = 0,75$	60	0,1	0,76%	1,48%	1,43%
	300		0,03% <sup>(1)</sup>	0,63% <sup>(1)</sup>	0,56% <sup>(1)</sup>
$H_3/H_1 = 0,50$	60	0,1	0,64% <sup>(1)</sup>	2,44% <sup>(1)</sup>	2,40% <sup>(1)</sup>
	300		0,04% <sup>(1)</sup>	1,07% <sup>(2)</sup>	0,98% <sup>(2)</sup>
$E/H_1 = 2$	60	0,1	6,23% <sup>(1)</sup>	4,62% <sup>(1)</sup>	4,73% <sup>(1)</sup>
	150		9,84% <sup>(1)</sup>	0,42% <sup>(1)</sup>	0,93% <sup>(1)</sup>
$E/H_1 = 0,25$	60	0,1	4,54% <sup>(1)</sup>	0,29% <sup>(1)</sup>	0,45% <sup>(1)</sup>
	150		2,67% <sup>(1)</sup>	0,75% <sup>(1)</sup>	0,82% <sup>(1)</sup>

Análise de incerteza efetuada pelo método de extrapolação de *Richardson* e através de três malhas de refinamento consecutivo. A ordem de convergência verificada foi de primeira ordem, exceto nos casos:

- (1) Não se verificou convergência entre as três malhas, pelo que se considerou primeira ordem de convergência e utilizou-se as duas malhas mais refinadas para o cálculo da incerteza associada;  
 (2) Ordem de convergência de segundo grau.

## 6.1. Caso base

### 6.1.1. Comprimentos de Escoamento Separado

Quando o escoamento se encontra sob o domínio de forças viscosas, ou seja, baixos números de *Reynolds*, os comprimentos de escoamento separado vertical verificam-se reduzidos e apenas presentes para a fração de caudal  $\beta = 0,9$  (Figura 21). O aumento do número de *Reynolds* e consequente aumento do domínio das forças de inércia originam maiores comprimentos de escoamento separado, sendo que os comprimentos máximos ocorrem para menores frações de caudal  $\beta - \beta = 0,4$  para  $Re_{D_{hid}} = 300$  (Figura 21).

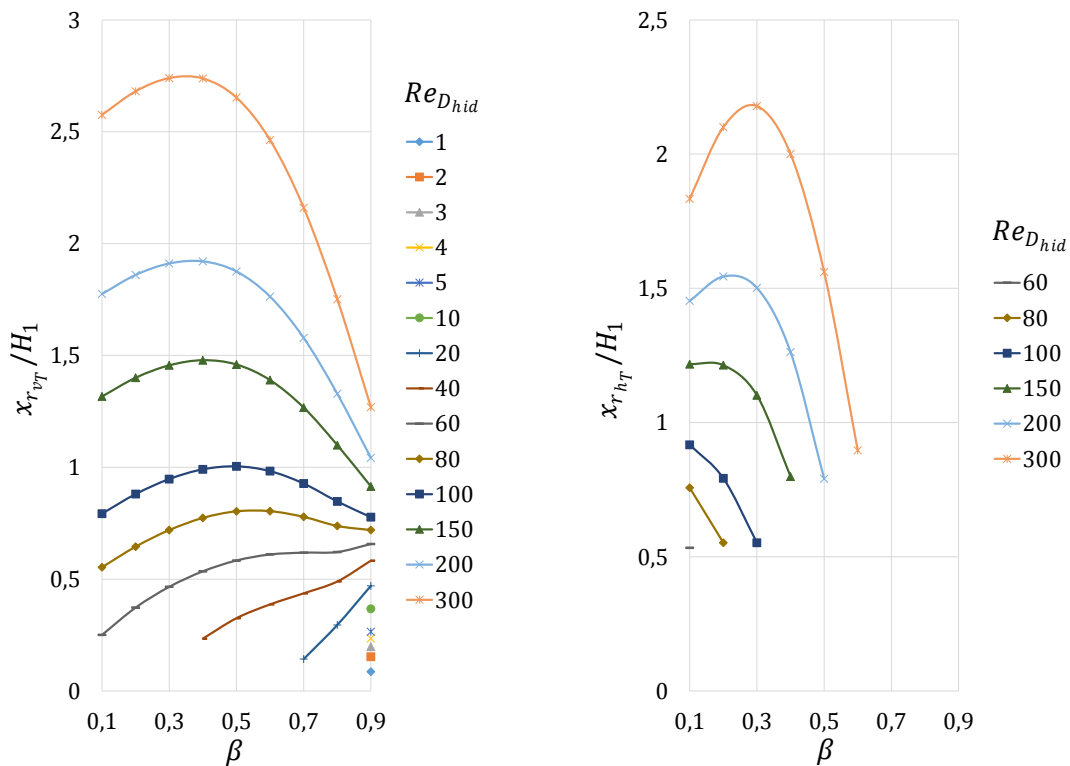


Figura 21 – Comprimentos de escoamento separado, vertical (à esquerda) e horizontal (à direita), para o caso base (adimensionais) e em função da fração de caudal  $\beta$ .

Uma vez que o escoamento 1 – 2 não sofre qualquer mudança de direção, os fenómenos de escoamento separado horizontal dão-se numa menor escala comparativamente com os do fenómeno de escoamento separado vertical (Figura 21). O aumento da fração de caudal  $\beta$ , ou diminuição do número de *Reynolds*, revelam reduzir e, em certos casos, extinguir a região de escoamento separado horizontal (Figura 21).

Os comprimentos de escoamento de ambas as regiões são tanto maiores, quanto maior o número de *Reynolds*, e variam linearmente para elevado número de *Reynolds* (Figura 22).

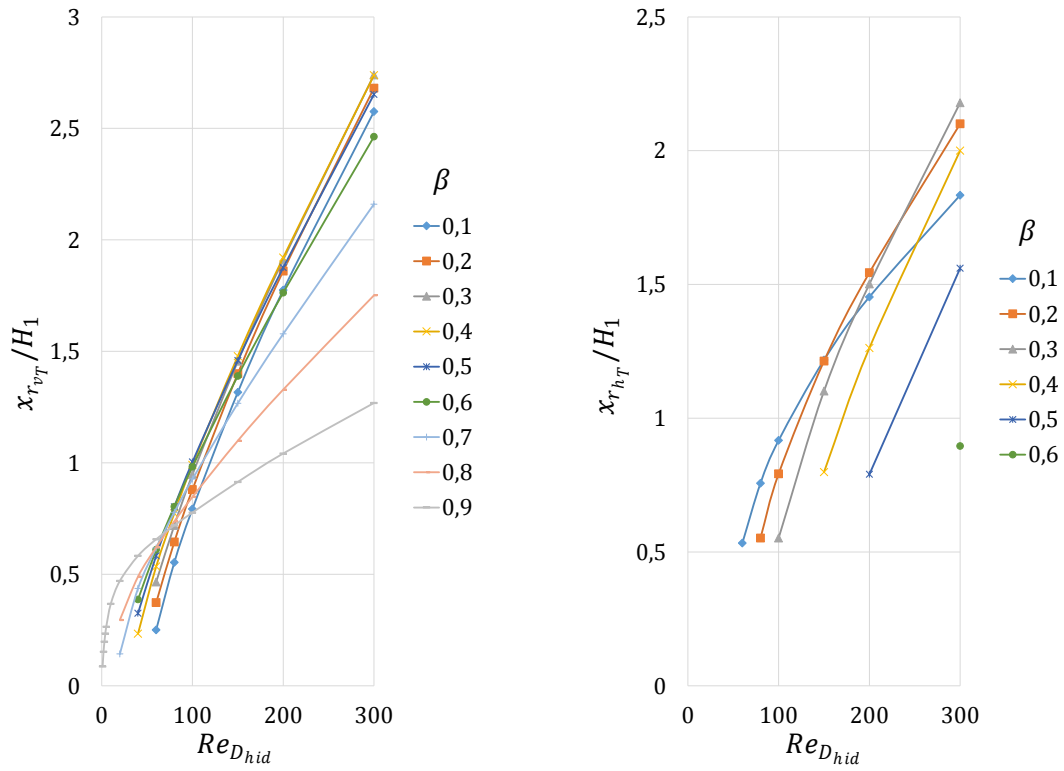


Figura 22 – Comprimentos de escoamento separado, vertical (à esquerda) e horizontal (à direita), para o caso base (adimensionais) e em função do número de Reynolds.

### 6.1.2. Coeficientes de perda de carga

Os coeficientes de perda de carga apresentam um comportamento cuja região de transição entre o domínio de forças viscosas, e o domínio de forças de inércia se encontra bem definida e ocorre para  $Re_{D_{hid}} \approx 20$ , evidenciando um comportamento inversamente proporcional para baixo número de *Reynolds* (Figura 23).

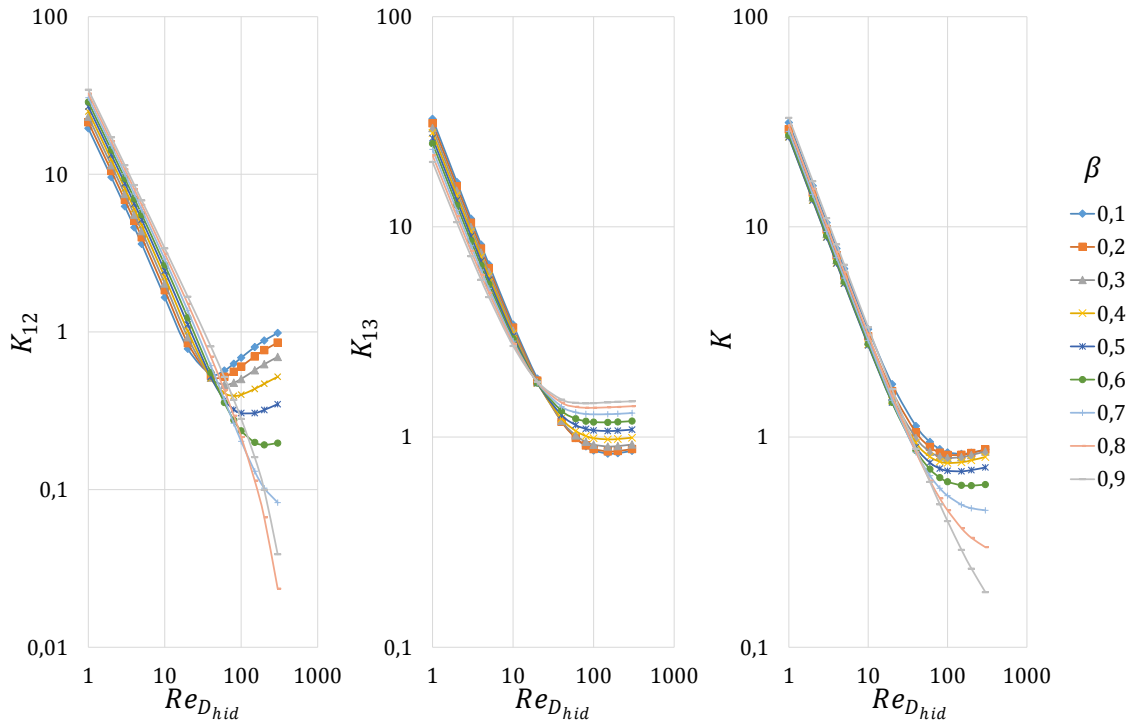


Figura 23 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita –  $K_{12}$ ,  $K_{13}$  e  $K$ ) para o caso base e em função do número de Reynolds.

Os coeficientes de perda de carga parcial apresentam para baixo número de Reynolds um comportamento polinomial de primeira ordem em função da fração de caudal  $\beta$  (Figura 24).

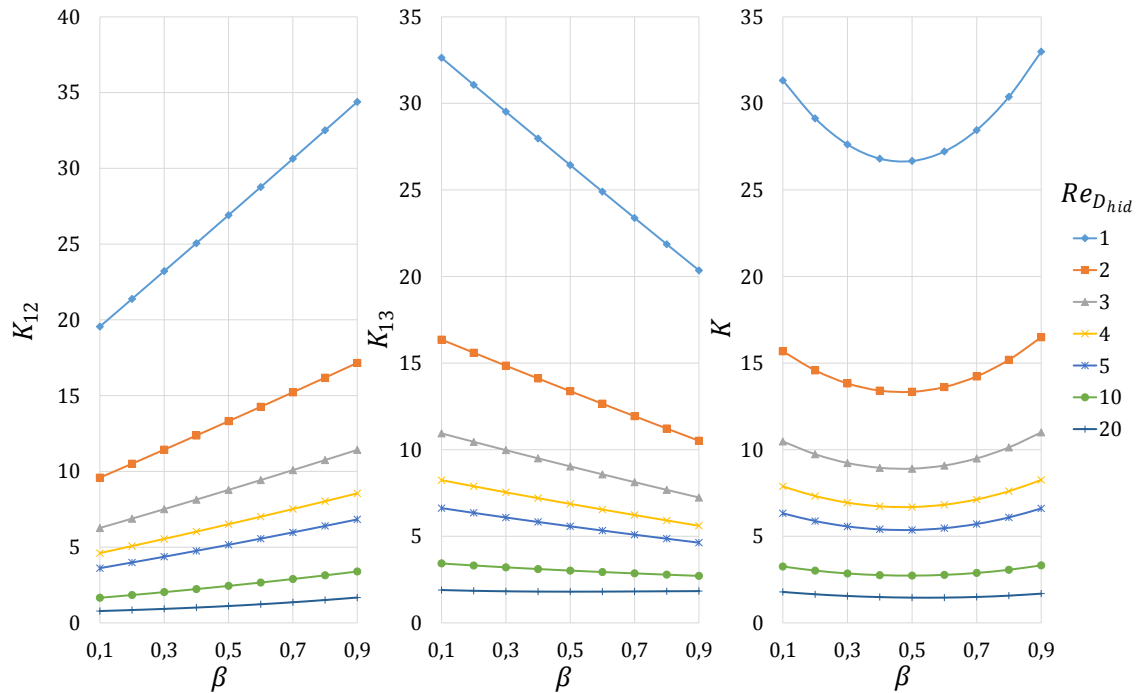


Figura 24 – Coeficientes de perda de carga (da esquerda para a direita –  $K_{12}$ ,  $K_{13}$  e  $K$ ) para o caso base e em função da fração de caudal  $\beta$  para  $Re_{D_{hid}} \leq 20$ .

Enquanto para elevado número de *Reynolds*, os coeficientes de perda de carga parcial apresentam um comportamento polinomial de ordem superior a um (Figura 25).

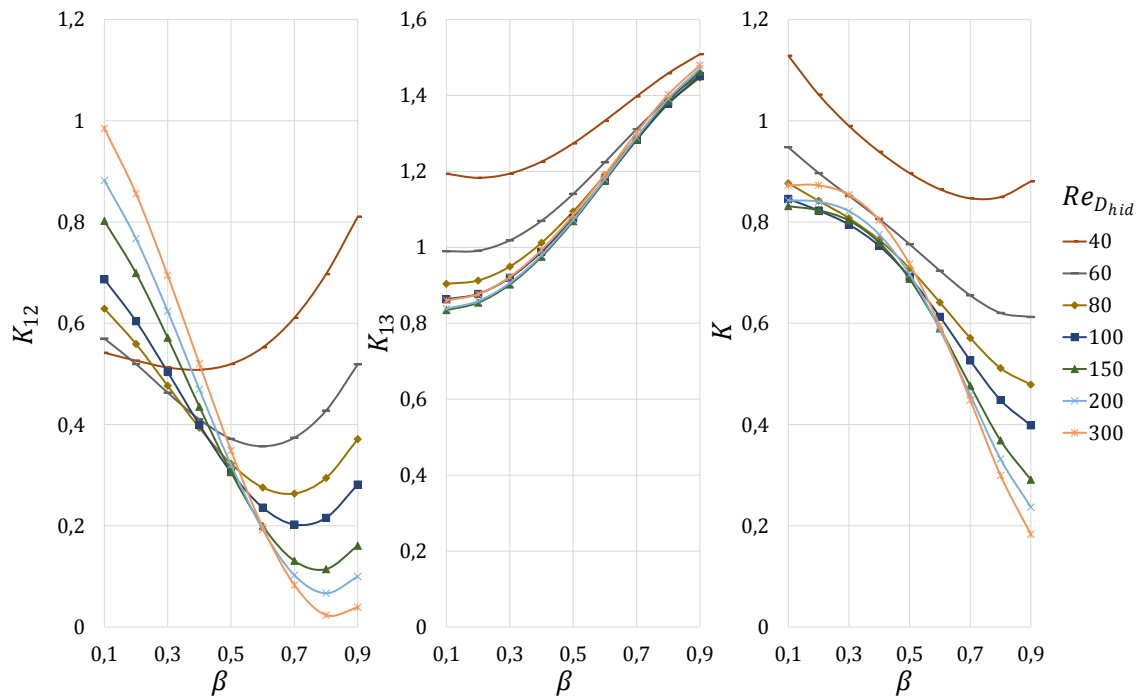


Figura 25 – Coeficientes de perda de carga (da esquerda para a direita –  $K_{12}$ ,  $K_{13}$  e  $K$ ) para o caso base e em função da fração de caudal  $\beta$  para  $Re_{D_{hid}} > 20$ .

Os resultados sugerem que o domínio das forças viscosas presente nos casos dinâmicos de  $Re_{D_{hid}} < 20$  faz com que a desaceleração brusca do escoamento à saída da conduta 1 produza elevadas perdas de carga, principalmente no escoamento cuja desaceleração é desfavorável (Figura 24). Ou seja, os coeficientes de perda de carga parciais de cada escoamento são tanto maiores, quanto maior a sua fração de caudal.

Para os casos dinâmicos de  $Re_{D_{hid}} > 20$ , e consequente domínio das forças de inércia, os resultados sugerem que a principal causa de perda de carga seja o efeito de *Bernoulli* sentido no escoamento de menor fração de caudal (Figura 25). Assim, os coeficientes de perda de carga parcial de cada escoamento são tão maiores, quanto menor a sua fração de caudal.

## 6.2. Efeito do parâmetro geométrico $\theta$

### 6.2.1. Comprimentos de Escoamento Separado

A diminuição do parâmetro geométrico  $\theta$  origina comprimentos de escoamento separado vertical inferiores para frações de caudal  $\beta$  reduzidas, e comprimentos superiores para frações de caudal  $\beta$  elevadas (Figura 26). O aumento de  $\theta$  apresenta um efeito praticamente oposto. Para frações de caudal  $\beta$  intermédias não se verificam grandes alterações (Figura 26).

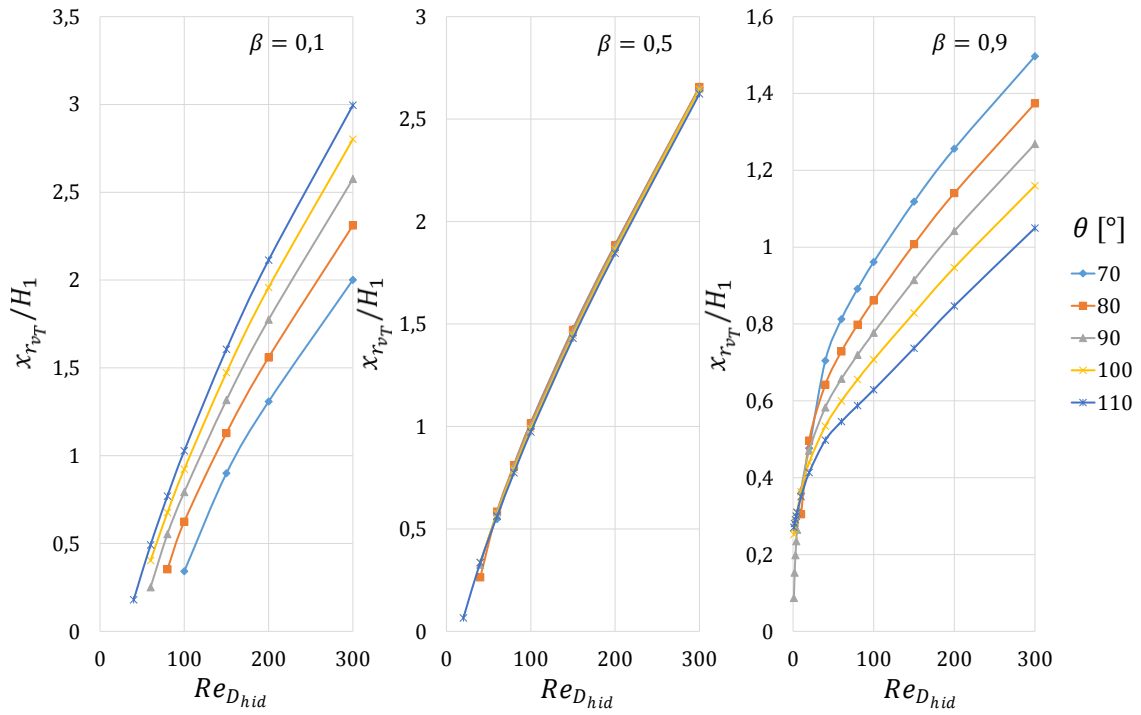


Figura 26 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) em função do número de Reynolds para diferentes frações de caudal  $\beta$  e diferentes valores de  $\theta$ .

A região de escoamento separado horizontal apresenta-se praticamente inalterada com a diminuição ou aumento do parâmetro geométrico  $\theta$  (Figura 27).

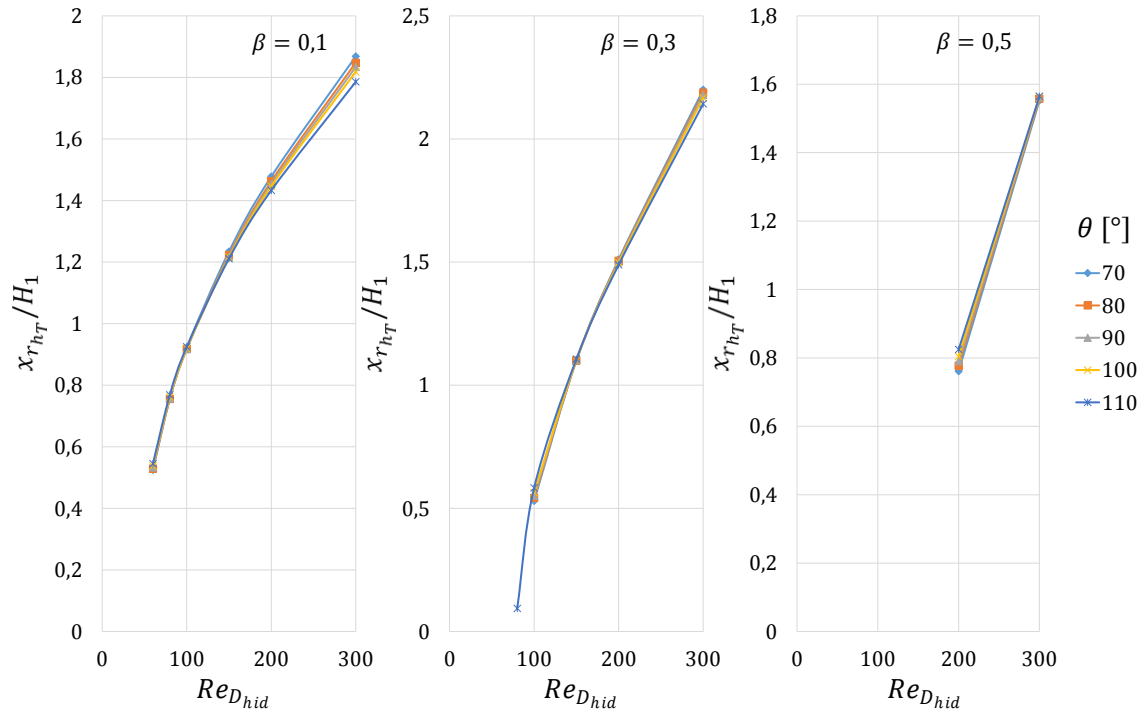


Figura 27 – Comprimentos de escoamento separado horizontal (adimensionais) em função do número de Reynolds para diferentes frações de caudal  $\beta$  e diferentes valores de  $\theta$ .

### 6.2.2. Coeficientes de Perda de Carga

Quer a diminuição, quer o aumento do parâmetro geométrico  $\theta$ , não originam variações de grande dimensão no coeficiente de perda de carga parcial  $K_{12}$  (Figura 28 e Figura 29).

Os resultados mostram que para frações de caudal  $\beta$  reduzidas, a diminuição e o aumento do parâmetro geométrico  $\theta$ , provocam respetivamente menores e maiores coeficientes de perda de carga parcial  $K_{13}$  e total  $K$  (Figura 28). A influência da alteração do parâmetro geométrico  $\theta$  faz-se sentir com mais intensidade quando o escoamento é dominado por forças de inércia. Os resultados sugerem portanto a existência de uma relação direta entre o coeficiente de perda de carga parcial  $K_{13}$  e a menor ou maior dificuldade de mudança de direção do escoamento 1-3.

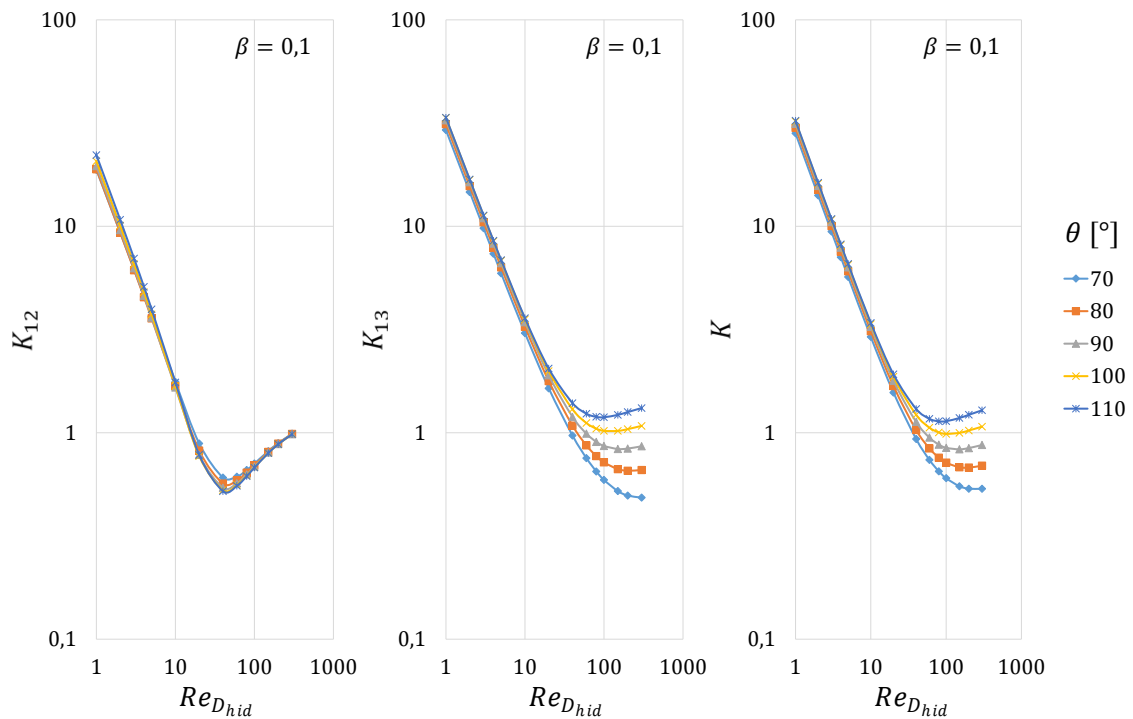


Figura 28 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita –  $K_{12}$ ,  $K_{13}$  e  $K$ ) em função do número de Reynolds para a fração de caudal  $\beta = 0,1$  e diferentes valores de  $\theta$ .

Para frações de  $\beta$  elevadas, não se verificam grandes alterações com a modificação do parâmetro geométrico  $\theta$  (Figura 29).

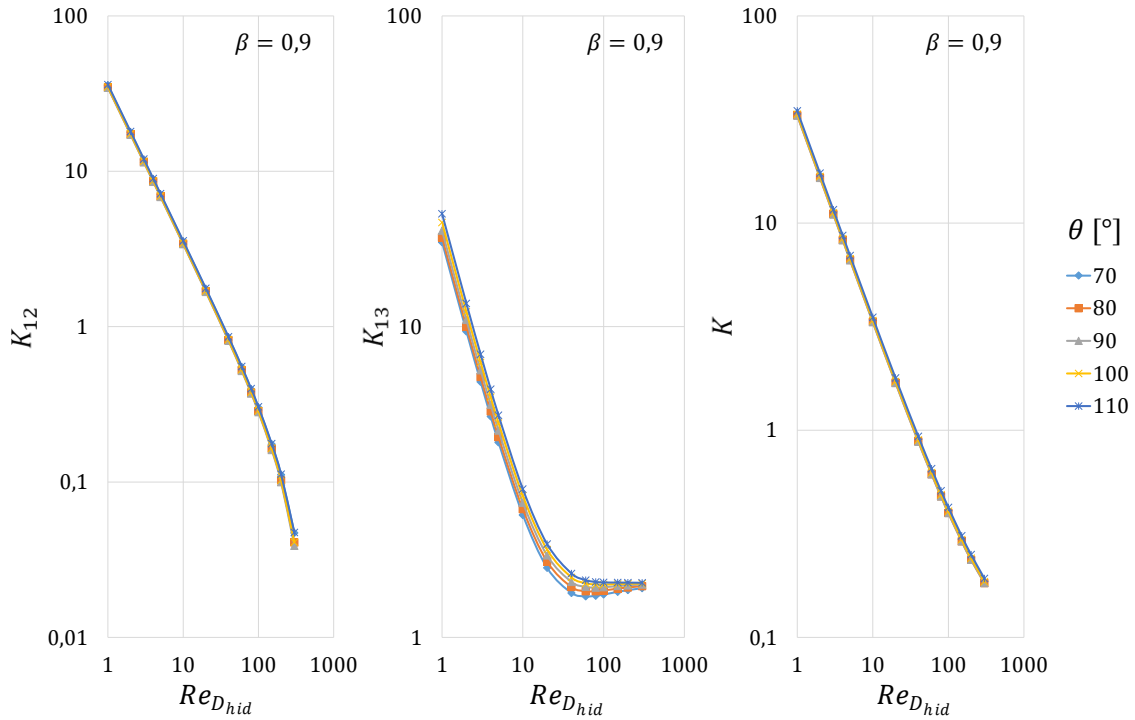


Figura 29 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita –  $K_{12}$ ,  $K_{13}$  e  $K$ ) em função do número de Reynolds para a fração de caudal  $\beta = 0,9$  e diferentes valores de  $\theta$ .

### 6.3. Efeito do parâmetro geométrico $H_2/H_1$

#### 6.3.1. Comprimentos de Escoamento Separado

A diminuição do parâmetro geométrico  $H_2/H_1$  provoca comprimentos de escoamento separado vertical e horizontal menores – tanto menores, quanto maior o número de *Reynolds* – sendo o seu efeito mais sentido nos comprimentos de escoamento separado horizontal (Figura 30 e Figura 31).



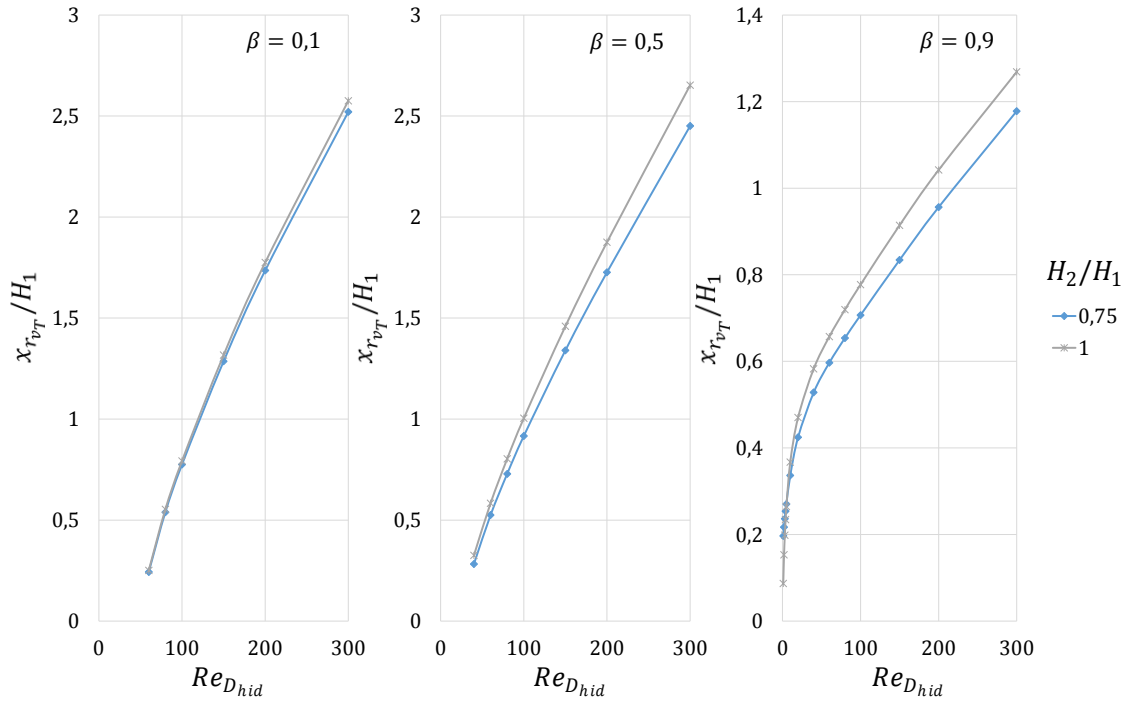


Figura 30 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) em função do número de Reynolds para diferentes frações de caudal  $\beta$  e diferentes valores de  $H_2/H_1$ .

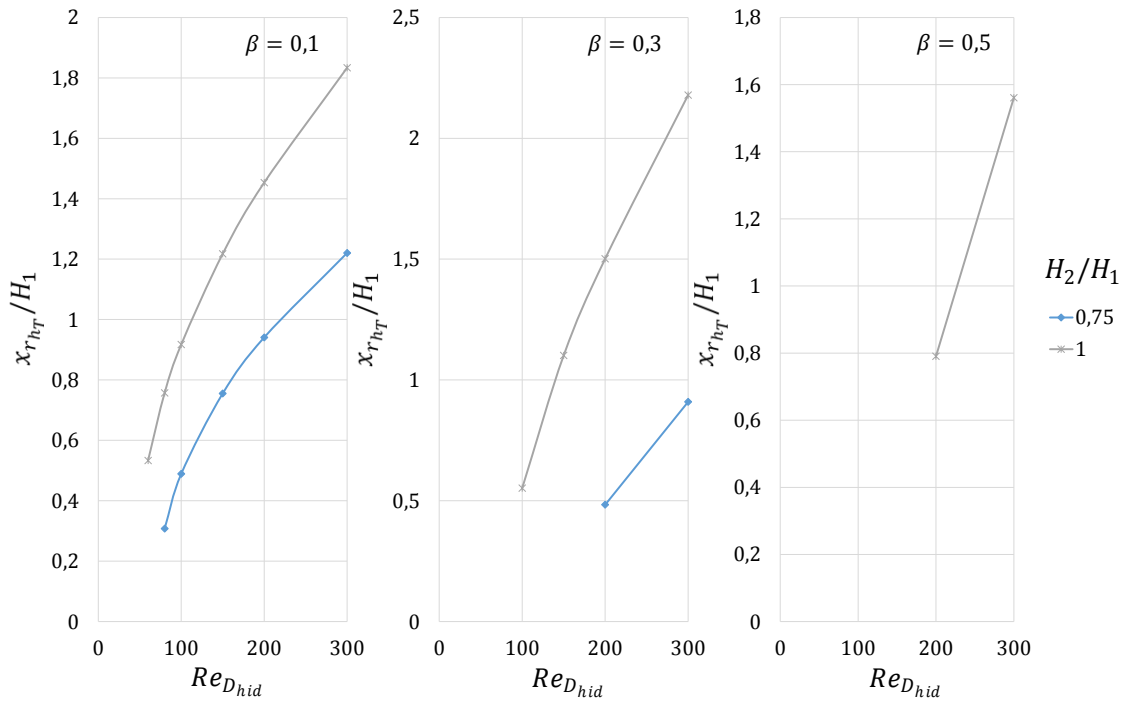


Figura 31 – Comprimentos de escoamento separado horizontal (adimensionais) em função do número de Reynolds para diferentes frações de caudal  $\beta$  e diferentes valores de  $H_2/H_1$ .

### 6.3.2. Coeficientes de perda de carga

Para frações de caudal  $\beta$  reduzidas, a diminuição do parâmetro geométrico  $H_2/H_1$  não origina variações de grande dimensão nos coeficientes de perda de carga (Figura 32).

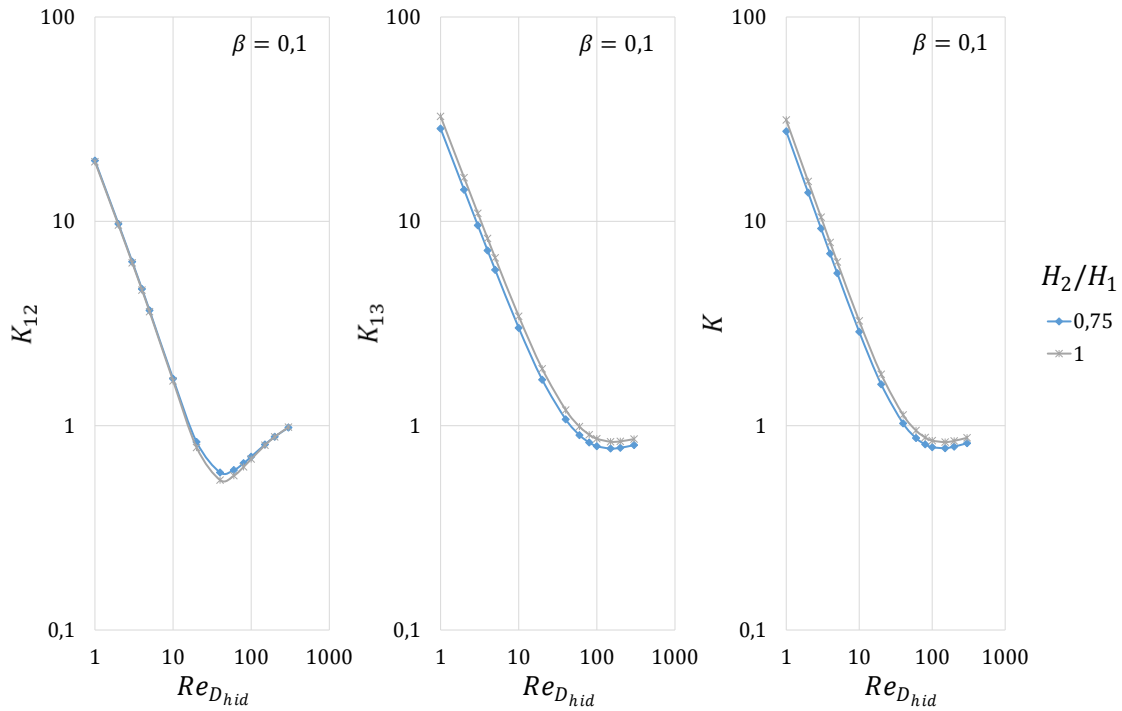


Figura 32 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita –  $K_{12}$ ,  $K_{13}$  e  $K$ ) em função do número de Reynolds para a fração de caudal  $\beta = 0,1$  e diferentes valores de  $H_2/H_1$ .

Para frações de caudal  $\beta$  elevadas, a diminuição do parâmetro geométrico  $H_2/H_1$  provoca respetivamente um aumento e uma diminuição nos coeficientes de perda de carga parcial  $K_{12}$  e  $K_{13}$ . Os resultados sugerem portanto a existência de uma relação direta entre o coeficiente de perda de carga parcial  $K_{12}$  e a maior resistência de entrada da conduta 2, devido a menor altura  $H_2$  (Figura 33).

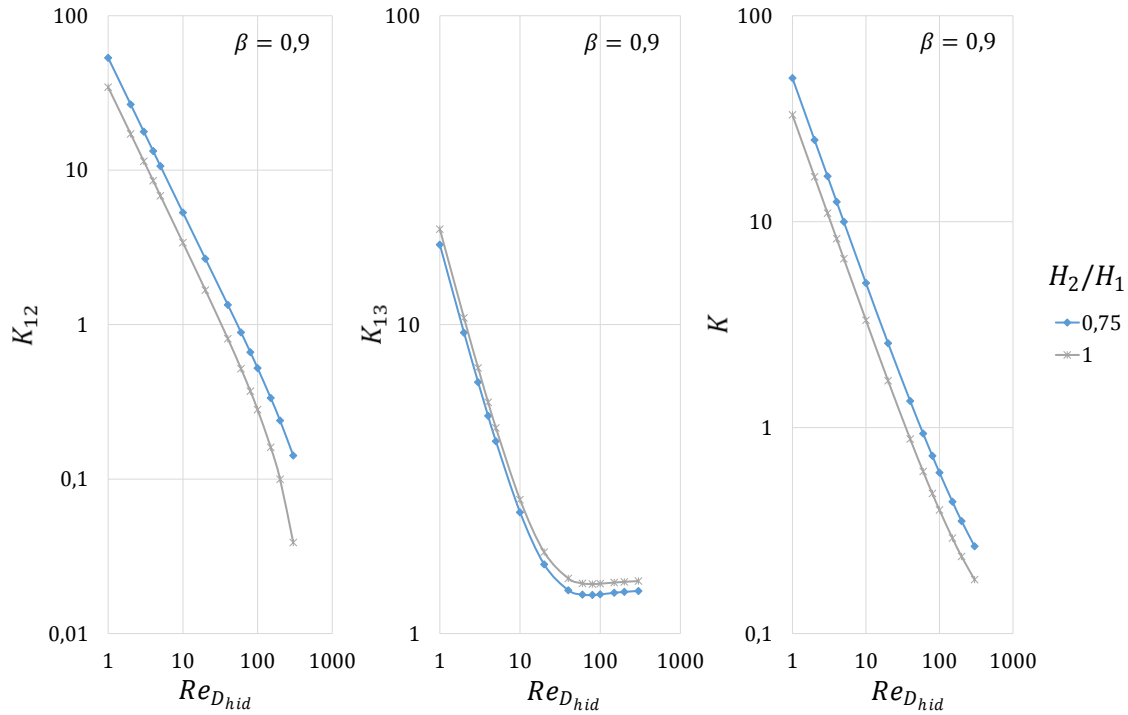


Figura 33 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita –  $K_{12}$ ,  $K_{13}$  e  $K$ ) em função do número de Reynolds para a fração de caudal  $\beta = 0,9$  e diferentes valores de  $H_2/H_1$ .

#### 6.4. Efeito do parâmetro geométrico $H_3/H_1$

##### 6.4.1. Comprimentos de Escoamento Separado

A diminuição do parâmetro geométrico  $H_3/H_1$  provoca comprimentos de escoamento separado vertical e horizontal menores – tanto menores, quanto maior o número de *Reynolds* – sendo o seu efeito mais sentido nos comprimentos de escoamento separado vertical (Figura 34 e Figura 35).

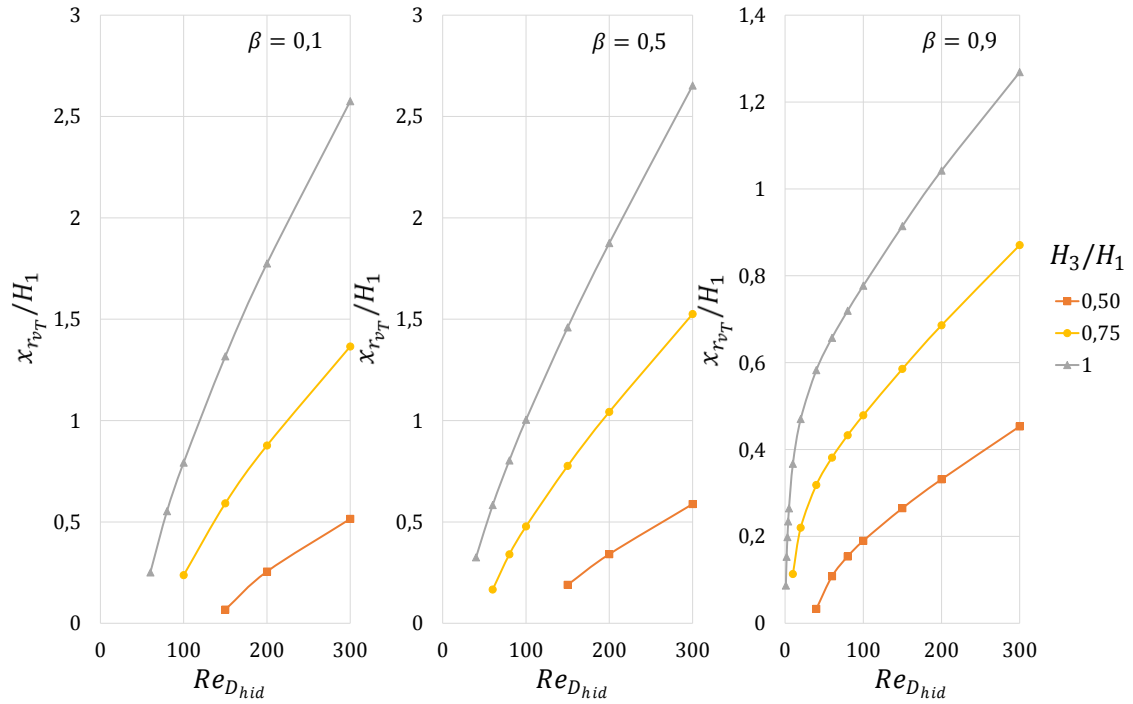


Figura 34 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) em função do número de Reynolds para diferentes frações de caudal  $\beta$  e diferentes valores de  $H_3/H_1$ .

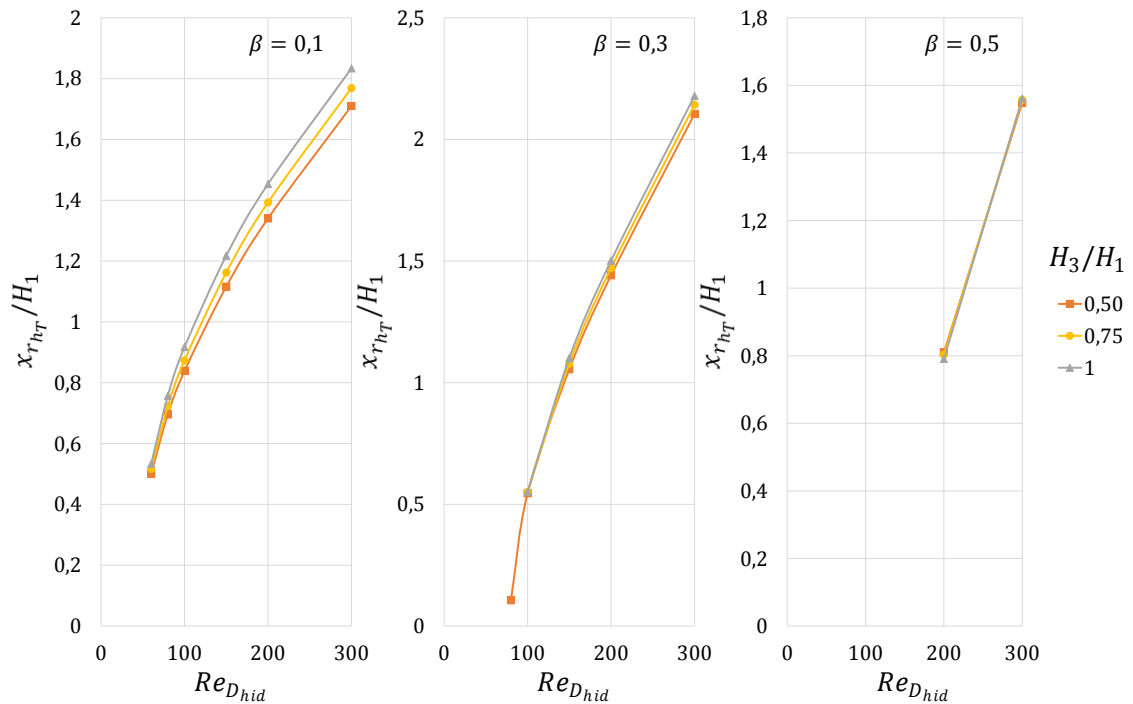


Figura 35 – Comprimentos de escoamento separado horizontal (adimensionais) em função do número de Reynolds para diferentes frações de caudal  $\beta$  e diferentes valores de  $H_3/H_1$ .

#### 6.4.2. Coeficientes de Perda de Carga

A diminuição do parâmetro geométrico  $H_3/H_1$  origina menores coeficientes de perda de carga parcial  $K_{12}$  e maiores coeficientes de perda de carga parcial  $K_{13}$  (Figura 36

e Figura 37). Relativamente ao coeficiente de perda de carga total  $K$ , a diminuição do parâmetro geométrico  $H_3/H_1$  origina maiores coeficientes para frações de caudal  $\beta$  reduzidas, e menores coeficientes para frações elevadas (Figura 36 e Figura 37).

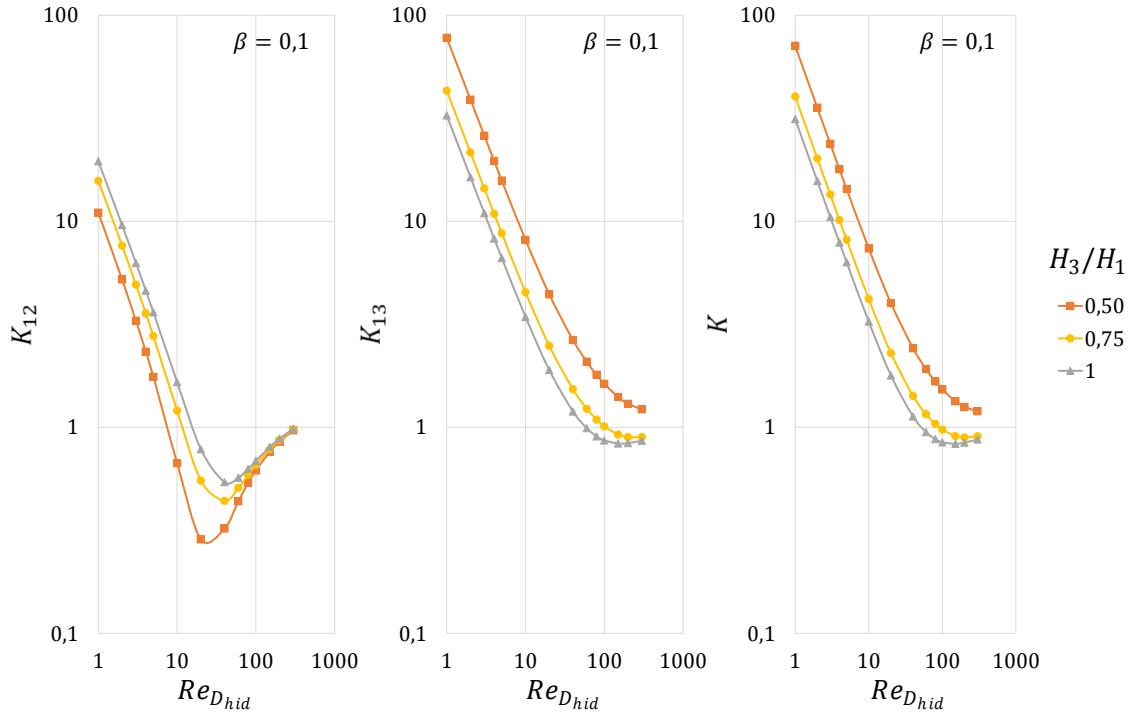


Figura 36 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita –  $K_{12}$ ,  $K_{13}$  e  $K$ ) em função do número de Reynolds para a fração de caudal  $\beta = 0,1$  e diferentes valores de  $H_3/H_1$ .

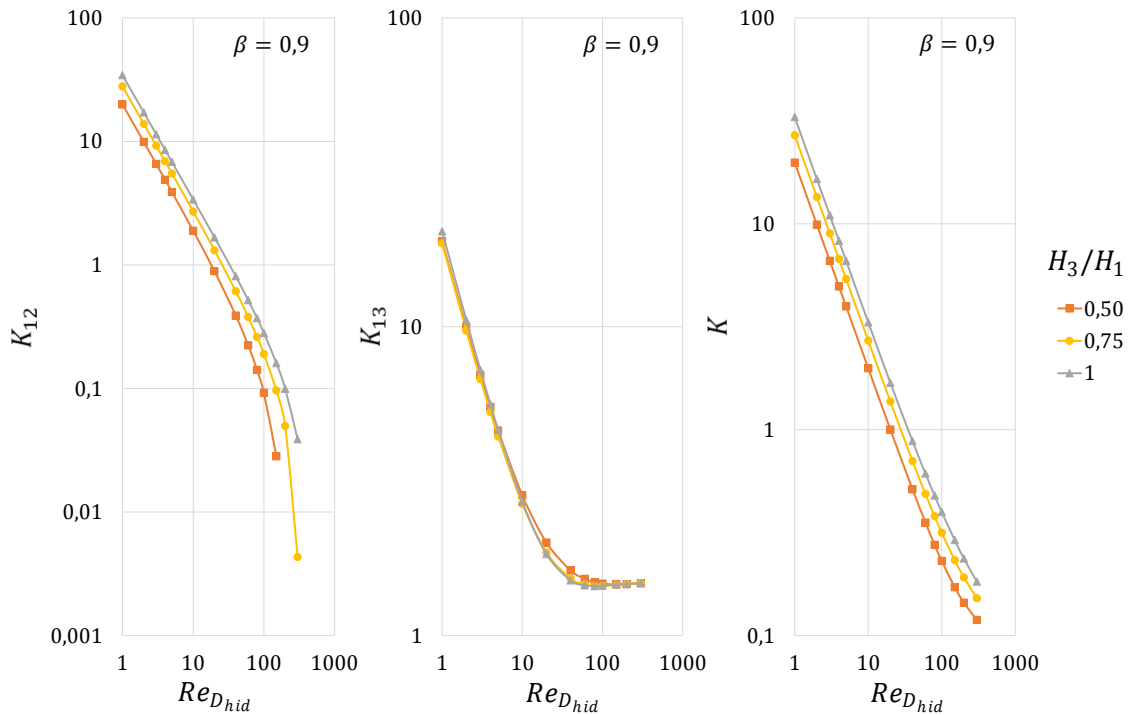


Figura 37 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita –  $K_{12}$ ,  $K_{13}$  e  $K$ ) em função do número de Reynolds para a fração de caudal  $\beta = 0,9$  e diferentes valores de  $H_3/H_1$ .

## 6.5. Efeito do parâmetro geométrico $E/H_1$

### 6.5.1. Comprimentos de Escoamento Separado

A diminuição do parâmetro geométrico  $E/H_1$  não revela um comportamento estrito em relação aos comprimentos de escoamento separado nos casos de estudo entre  $E/H_1 = 2$  e  $E/H_1 = 0,25$  (Figura 38 e Figura 39). Os comprimentos de escoamento separado vertical e horizontal no plano de simetria da conduta ( $z/E = 0,5$ ) revelam a existência de um rácio  $E/H_1 \neq \infty$  para o qual os comprimentos de escoamento separado são máximos. Contudo, pode-se afirmar que  $E/H_1 \ll 1$  origina uma diminuição, e em certos casos, extinção de ambas as regiões de escoamento separado. Para  $E/H_1 = 0,25$  o fenómeno de escoamento separado vertical apenas se verifica para  $Re_{D_{hid}} \geq 40$  e o fenómeno de escoamento separado horizontal para  $Re_{D_{hid}} \geq 150$ .

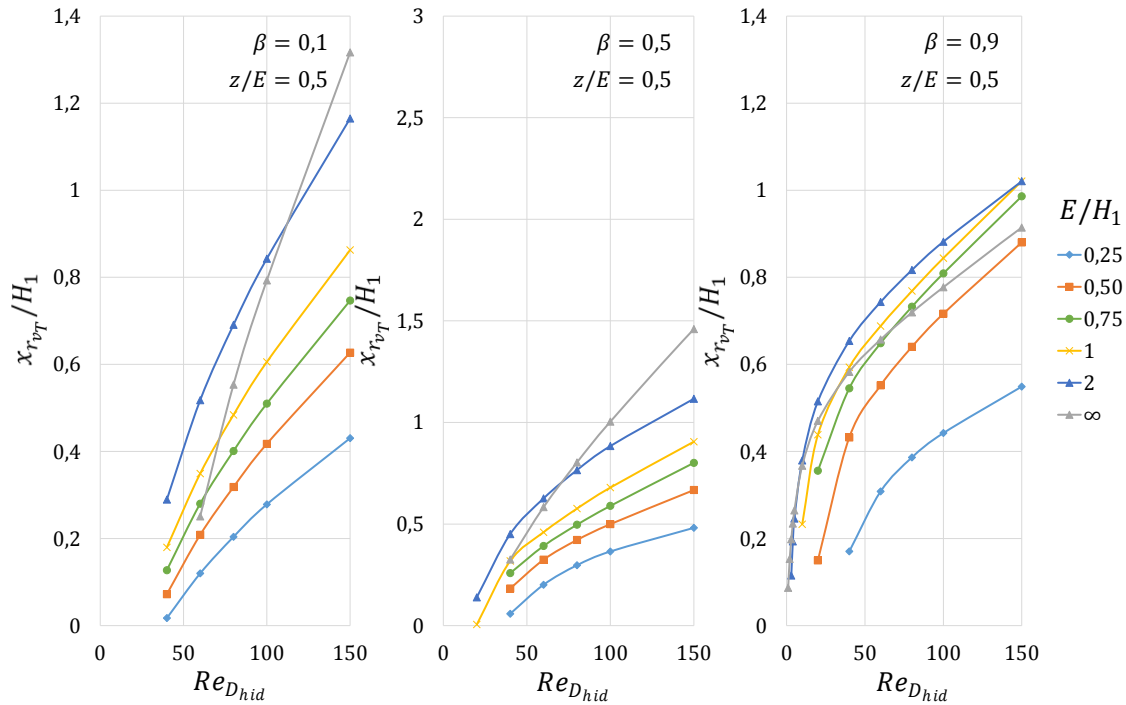


Figura 38 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) calculados no plano de simetria ( $z/E = 0,5$ ) em função do número de Reynolds para diferentes frações de caudal  $\beta$  e diferentes valores de  $E/H_1$ .

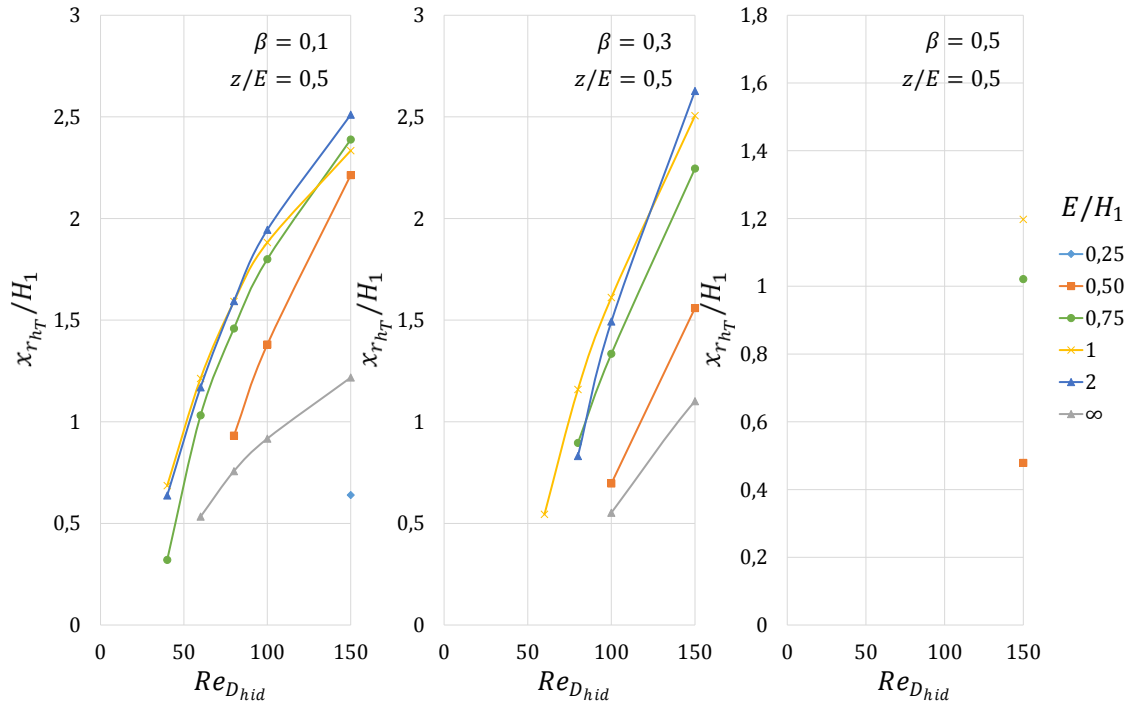


Figura 39 – Comprimentos de escoamento separado horizontal (adimensionais) calculados no plano de simetria ( $z/E = 0,5$ ) em função do número de Reynolds para diferentes frações de caudal  $\beta$  e diferentes valores de  $E/H_1$ .

Para  $E/H_1 = 2$  e para baixo número de *Reynolds*, a configuração espacial da região de escoamento separado vertical mostra que o fenômeno apresenta uma forma retangular e em todo o comprimento  $z$  (para  $\beta = 0,9$ ). A diminuição da fração de caudal  $\beta$  tende a concentrar a região de escoamento separado no plano de simetria e a diminuir a sua área, conferindo-lhe uma forma oval e de menor comprimento de escoamento separado no plano de simetria. O aumento do número de *Reynolds* provoca o aumento da área de escoamento separado e o alongamento da forma oval, de tal forma, que no plano de simetria são as frações de caudal  $\beta$  reduzidas que apresentam maiores comprimentos de escoamento separado (Figura 40).

Relativamente à configuração espacial da região de escoamento separado horizontal e para baixo número de *Reynolds*, o fenômeno apresenta a forma de um V invertido no início e comportamento constantes ao longo da coordenada  $z$  (para  $\beta = 0,1$ ). O aumento da fração de caudal  $\beta$  tende a diminuir a área de escoamento separado e a extinguir o fenômeno no plano de simetria, dividindo a região de escoamento separado em duas regiões – nas paredes laterais (de coordenadas  $z = 0$  e  $z = 1$ ). O aumento do número de *Reynolds* provoca o aumento da área de escoamento separado (Figura 41).

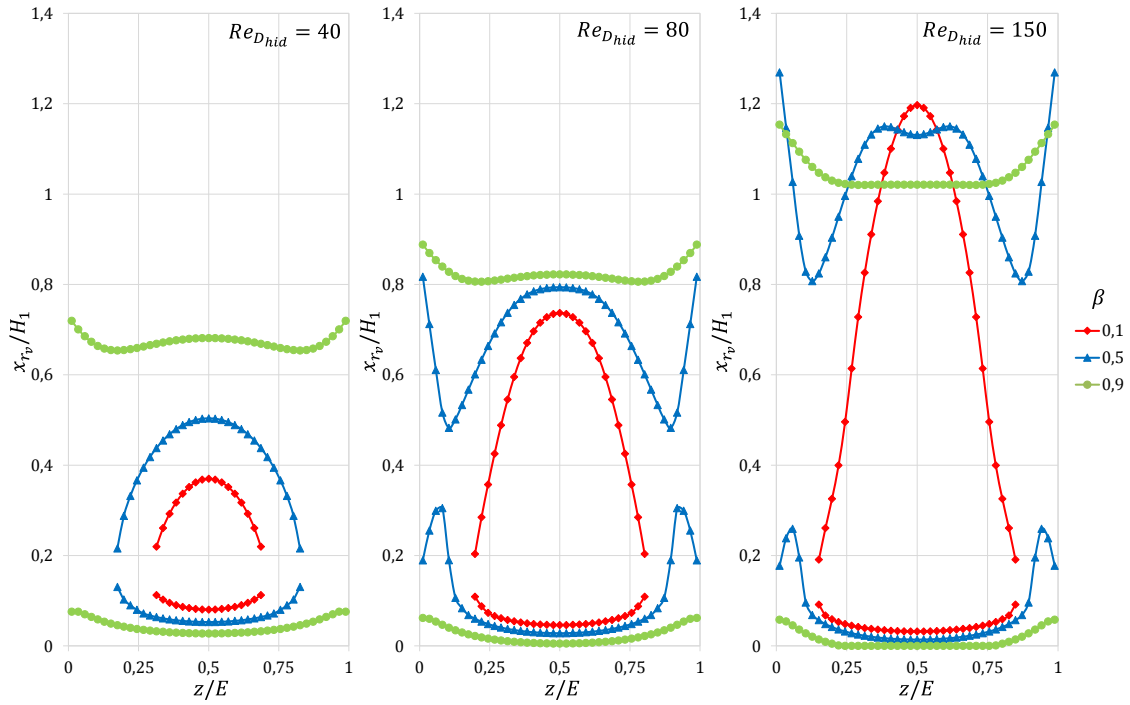


Figura 40 - Posições (adimensionais) de início (curvas inferiores) e fim (curvas superiores) da região de escoamento separado vertical para  $E/H_1 = 2$  e em função da coordenada  $z$  (adimensional).

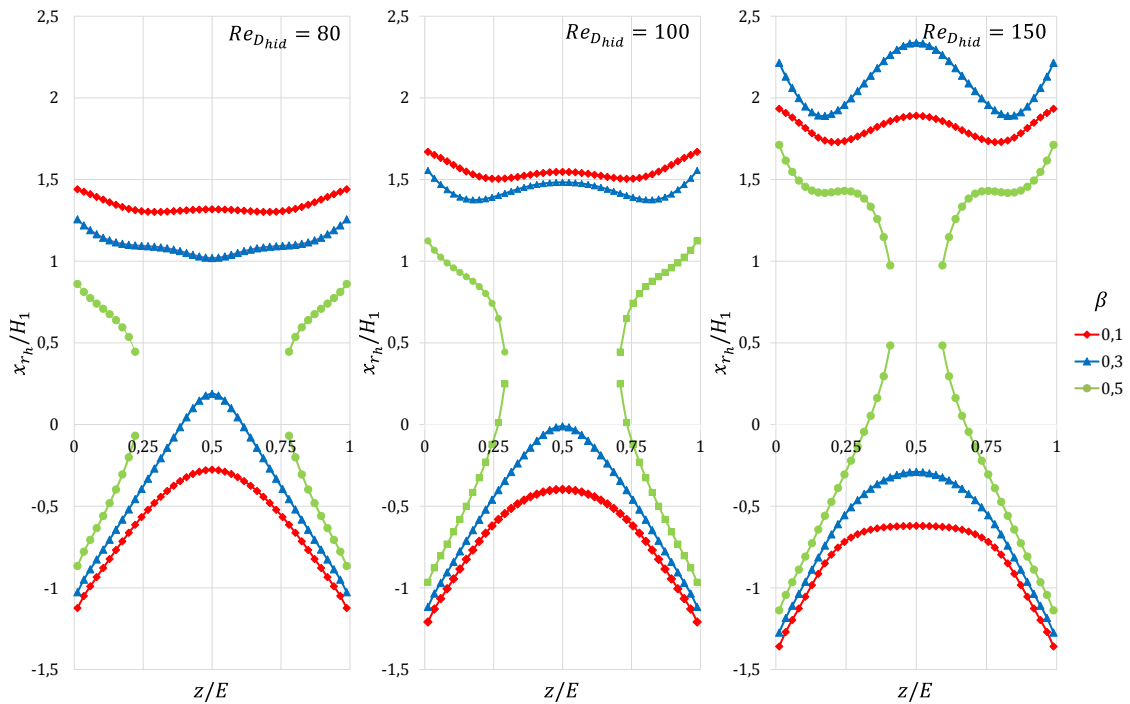


Figura 41 - Posições (adimensionais) de início (curvas inferiores) e fim (curvas superiores) da região de escoamento separado horizontal para  $E/H_1 = 2$  e em função da coordenada  $z$  (adimensional).

Para  $E/H_1 = 0,25$  e para baixo número de *Reynolds*, a configuração espacial da região de escoamento separado vertical mostra que o fenómeno apresenta uma geometria em forma de U (para  $\beta = 0,9$ ). A diminuição da fração de caudal  $\beta$  tende a concentrar a região de escoamento separado no plano de simetria e a diminuir a sua área, conferindo-lhe uma forma elíptica e de menor comprimento de escoamento separado no plano de



simetria. Note-se também, que a diminuição de  $\beta$  origina em certos casos três regiões de escoamento separado – uma no plano de simetria, e duas nas paredes laterais (de coordenadas  $z = 0$  e  $z = 1$ ). O aumento do número de *Reynolds* provoca o aumento da área de escoamento separado e confere à região de escoamento separado uma forma retangular (Figura 42).

A configuração espacial da região de escoamento separado horizontal é similar à observada para  $E/H_1 = 2$ , com a diferença de que com menores comprimentos de escoamento separado e apenas para  $Re_{D_{hid}} \geq 150$  (Figura 43).

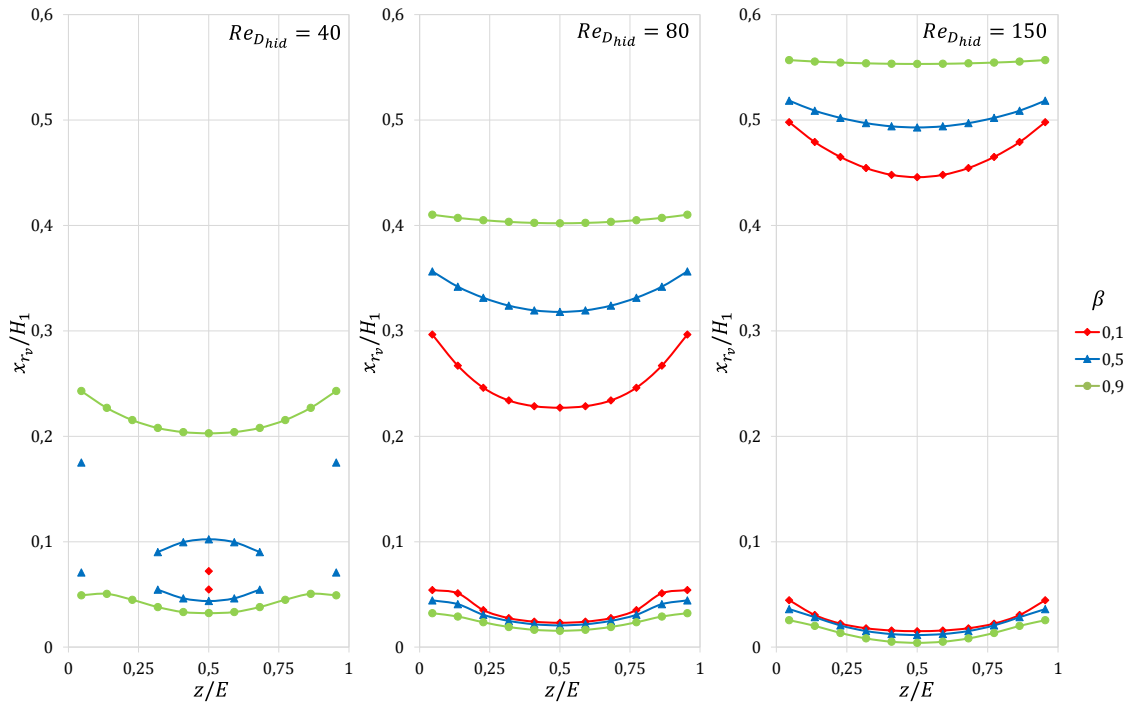


Figura 42 – Posições (adimensionais) de início (curvas inferiores) e fim (curvas superiores) da região de escoamento separado vertical para  $E/H_1 = 0,25$  e em função da coordenada  $z$  (adimensional).

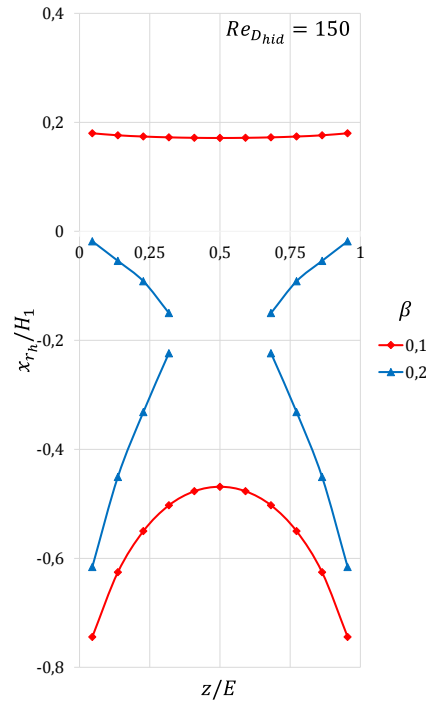


Figura 43 – Posições (adimensionais) de início (curvas inferiores) e fim (curvas superiores) da região de escoamento separado horizontal para  $E/H_1 = 0,25$  e em função da coordenada  $z$  (adimensional).

### 6.5.2. Coeficientes de perda de carga

Os resultados mostram que para baixo número de *Reynolds* e para uma geometria de parâmetro geométrico  $E/H_1 = 2$ , os coeficientes de perda de carga, parciais e total, permanecem praticamente inalteráveis (Figura 44 e Figura 45). A diminuição do parâmetro geométrico  $E/H_1$  para valores inferiores a 2 revela aumentar os coeficientes de perda de carga, parciais e total.

Para elevado número de *Reynolds*, o efeito tridimensional faz-se sentir com mais intensidade no coeficiente de perda de carga  $K_{13}$ , o qual regista um aumento, sendo que o coeficiente de perda de carga parcial  $K_{12}$  permanece praticamente inalterável (Figura 44 e Figura 45).

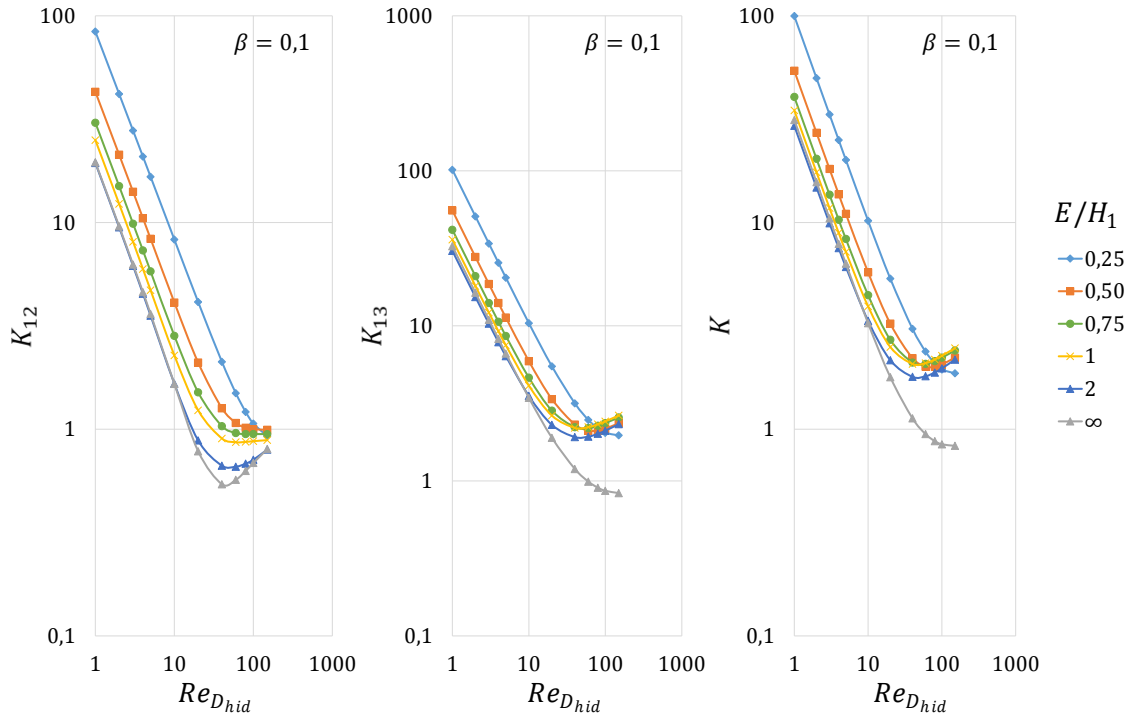


Figura 44 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita –  $K_{12}$ ,  $K_{13}$  e  $K$ ) em função do número de Reynolds para a fração de caudal  $\beta = 0,1$  e diferentes valores de  $E/H_1$ .

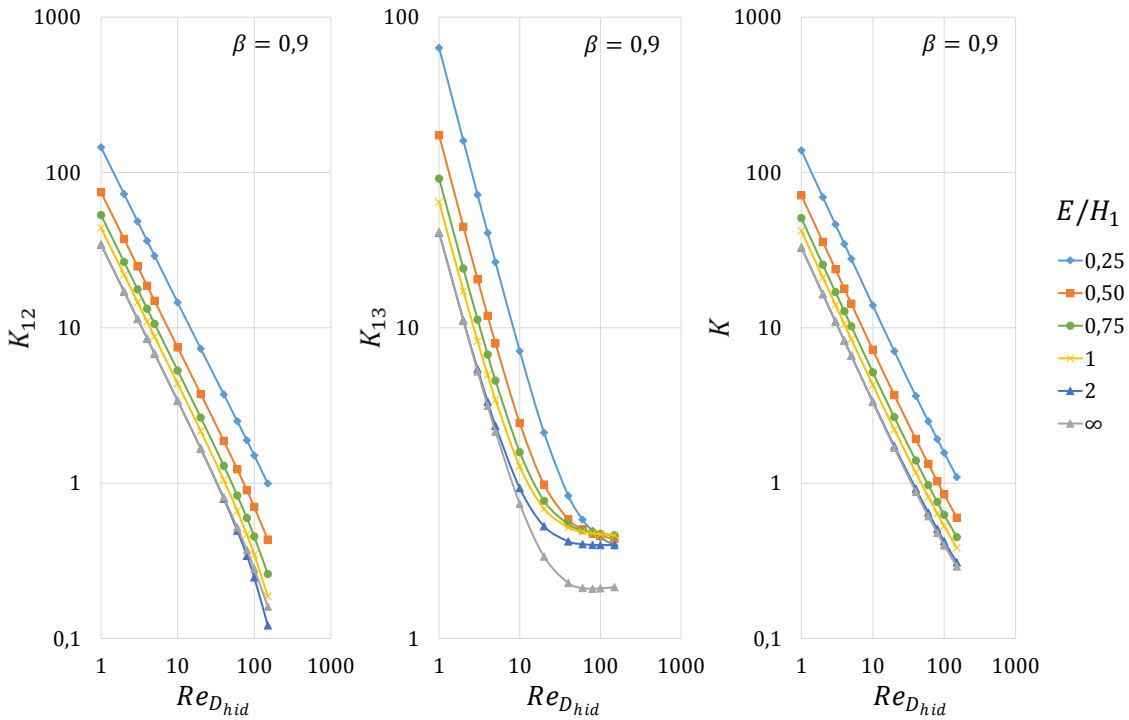


Figura 45 – Coeficientes de perda de carga em escala logarítmica (da esquerda para a direita –  $K_{12}$ ,  $K_{13}$  e  $K$ ) em função do número de Reynolds para a fração de caudal  $\beta = 0,9$  e diferentes valores de  $E/H_1$ .

## 7. Conclusões

### 7.1. Conclusões

Os resultados obtidos mostram que para qualquer razão de caudal  $\beta$  e qualquer geometria estudada os valores de perda de carga parciais e totais variam inversamente para baixo número de *Reynolds*.

Verifica-se que  $Re_{D_{hid}} < 20$  apresentam maiores valores de perda de carga – tão maiores, quanto menor o número de *Reynolds* (escoamento dominado por forças viscosas). Para  $Re_{D_{hid}} > 20$ , os valores de perda de carga são inferiores e convergem para uma constante (escoamento dominado por forças de inércia).

Para baixo número de *Reynolds*, as constantes de perda de carga parcial associadas aos escoamentos 1 – 2 e 1 – 3 são tão maiores, quanto maior a fração de caudal correspondente, e para elevado número de *Reynolds* são tanto menores, quanto maior a fração de caudal correspondente.

Quando comparado com o caso base, a diminuição ou aumento do parâmetro geométrico  $\theta$  apresenta uma influência diminuta no coeficiente de perda de carga parcial  $K_{12}$ , e o coeficiente de perda de carga parcial  $K_{13}$  revela resultados superiores para  $\theta > 90^\circ$ , e inferiores para  $\theta < 90^\circ$ .

A diminuição do parâmetro geométrico  $H_2/H_1$  apresenta uma aumento no coeficiente de perda de carga parcial  $K_{12}$  e manteve praticamente os resultados do caso base para o coeficiente de perda de carga parcial  $K_{13}$ .

A diminuição do parâmetro geométrico  $H_3/H_1$  apresenta uma diminuição no coeficiente de perda de carga parcial  $K_{12}$  e um aumento no coeficiente de perda de carga parcial  $K_{13}$ .

Para baixo número de *Reynolds* e geometrias de parâmetro geométrico  $E/H_1 > 1$  os coeficientes de perda de carga (parciais e total) permanecem praticamente constantes. Contudo, para geometrias de parâmetro geométrico  $E/H_1 < 1$  os resultados foram superiores ao caso base.

Ambos os fenómenos de escoamento separado apresentaram comprimentos superiores para números de *Reynolds* elevados. No entanto, o fenómeno de escoamento separado horizontal não ocorre para baixo número de *Reynolds* e apresentou de modo geral comprimentos de escoamento separado inferiores aos do fenómeno de escoamento separado vertical.

A diminuição de qualquer um dos parâmetros geométricos  $H_2/H_1$  e  $H_3/H_1$  origina simultaneamente menores comprimentos de escoamento separado vertical e horizontal, sendo que a diminuição de  $H_2/H_1$  apresenta uma influência maior nos comprimentos de escoamento separado horizontal, e a diminuição de  $H_3/H_1$  nos comprimentos de escoamento separado vertical.

A diminuição do parâmetro geométrico  $E/H_1$  revelou a existência de um rácio  $E/H_1 \neq \infty$  para o qual os comprimentos de escoamento separado são máximos. Contudo, quando  $E/H_1 \ll 1$  verifica-se diminuição, e em certos casos, extinção de ambas as regiões de escoamento separado. Para  $E/H_1 = 0,25$  o fenómeno de escoamento separado vertical

verifica-se apenas para  $Re_{D_{hid}} \geq 40$  e o fenómeno de escoamento separado horizontal para  $Re_{D_{hid}} \geq 150$ .

A região de escoamento separado vertical pode ocorrer apenas no plano de simetria da conduta vertical, e a região de escoamento separado horizontal pode ocorrer apenas junto às paredes laterais da conduta horizontal.

## 7.2. Sugestão para Trabalhos Futuros

### **Investigação**

Sugiro que se caracterize a configuração espacial das regiões de escoamento separado vertical e horizontal nas paredes laterais (paralelas ao plano de simetria).

Seria interessante avaliar a influência nos coeficientes de perda de carga através da introdução de cantos arredondados bem como a adição de uma conduta de raio  $r$  no início da conduta 3.

### **Malha**

Deve-se procurar realizar simulações com um refinamento superior, principalmente se o objetivo for a obtenção dos comprimentos de escoamento separado.

A solução de construção da malha revelou não ser a mais apropriada para certos casos geométricos, pelo que sugiro uma melhor adaptação aos diferentes casos estudados e comparação de valores.

## 8. Referências

1. **Munson, Bruce R., et al., et al.** *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 6<sup>a</sup>. s.l. : John Wiley & Sons, Inc., 2009.
2. *Micro reactors: principles and applications in organic synthesis*. **Fletcher, Paul D. I. e Haswell, J. Stephen.** [ed.] Elsevier Ltd. 2002, Tetrahedron, Vol. 609.
3. *Flow Patterns in Vessels of Simple and Complex Geometries*. **Karino, T, et al., et al.** s.l. : Ann NY Acad Sci, 1987, Vol. 516, pp. 422-441.
4. *Measurement and Calculations of Laminar Flow in a Ninety Degree Bifurcation*. **D., Liepsch, et al., et al.** [ed.] Pergamon Press Ltd. 1982, Journal of Biomechanics, Vols. 15, No. 7, pp. 473-485.
5. *Computation of Physiological Bifurcation Flows Using a Patched Grid*. **Lee, D. e Chiu, J. J.** [ed.] Pergamon Press Ltd. 1992, Vols. 21, No. 4, pp. 519-535.
6. *Numerical Investigation of Laminar Flows Through 90-Degree Diversions of Rectangular Cross-Section*. **Neary, V. S. e Sotiropoulos, F.** [ed.] Elsevier Science Ltd. 1996, Computers & Fluids, Vols. 25, No. 2, pp. 95-118.
7. *Steady and Unsteady Laminar Flows of Newtonian and Generalized Newtonian Fluids in a Planar T-Junction*. **Miranda, A. I. P., Oliveira, P. J. e Pinho, F. T.** [ed.] Wiley InterScience. 2007, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 57, pp. 295-328.
8. *Flow Field and Pressure Loss Analysis of Junction and its Structure Optimization of Aircraft Hydraulic Pipe System*. **Xin, Li e Shaoping, Wang.** [ed.] Elsevier Ltd. 2013, Chinese Journal of Aeronautics.
9. **White, Frank M.** *Viscous Fluid Flow*. 3<sup>a</sup>. s.l. : McGraw-Hill Companies, Inc., 2006.
10. **Versteeg, H K e Malalasekera, W.** *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. 2<sup>a</sup>. s.l. : Pearson Education Limited, 2007.
11. *The Flow Downstream of a Bifurcation of a Flow Channel for Uniform Flow Distribution Via Cascade Flow Channel Bifurcations*. **Liu, Hong, Li, Peiwen e Wang, Kai.** [ed.] Elsevier Ltd. 2015, Applied Thermal Engineering.
12. **Incropera, Frank P. e Witt, David P. de.** *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. [trad.] Horacio Macedo. 3<sup>a</sup>. s.l. : Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1992.

## Anexo A – Comprimentos de Escoamento separado

### Escoamento separado Vertical

#### Caso Base e Parâmetro Geométrico $\theta$

Tabela 14 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) para o parâmetro geométrico  $\theta$  em função do número de Reynolds e da fração de caudal  $\beta$

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$\theta = 70^\circ$			$\theta = 80^\circ$			$\theta = 90^\circ$ (Caso Base)			$\theta = 100^\circ$			$\theta = 110^\circ$		
		$\frac{x_{r_{vi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vT}}}{H_1}$
1	0,9	-	-	-	-	-	-	0,209	0,296	0,087	0,073	0,325	0,252	0,048	0,319	0,271
2	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,081	0,106	0,026
	0,9	-	-	-	-	-	-	0,175	0,328	0,153	0,068	0,337	0,269	0,046	0,327	0,281
3	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,070	0,128	0,058
	0,9	-	-	-	-	-	-	0,152	0,350	0,198	0,063	0,348	0,284	0,045	0,335	0,291
4	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,061	0,144	0,083
	0,9	-	-	-	-	-	-	0,133	0,368	0,235	0,060	0,358	0,299	0,043	0,343	0,300
5	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,057	0,159	0,102
	0,9	-	-	-	-	-	-	0,119	0,384	0,265	0,057	0,368	0,311	0,041	0,350	0,309
10	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,063	0,118	0,055
	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,064	0,210	0,145	0,045	0,221	0,176
	0,9	-	-	-	0,173	0,477	0,305	0,075	0,443	0,367	0,047	0,411	0,363	0,033	0,384	0,351
20	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,059	0,124	0,065
	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,069	0,154	0,085	0,047	0,177	0,130

	0,7	-	-	-	-	-	-	0,086	0,229	0,143	0,051	0,240	0,188	0,037	0,234	0,197
	0,8	-	-	-	0,122	0,376	0,253	0,060	0,355	0,295	0,041	0,331	0,289	0,029	0,308	0,279
	0,9	0,177	0,654	0,477	0,083	0,579	0,497	0,050	0,520	0,470	0,033	0,473	0,440	0,021	0,434	0,413
40	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,055	0,234	0,180
	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,075	0,209	0,134	0,048	0,277	0,229
	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,058	0,282	0,224	0,042	0,313	0,271
	0,4	-	-	-	-	-	-	0,077	0,311	0,234	0,049	0,337	0,287	0,035	0,343	0,308
	0,5	-	-	-	0,112	0,376	0,264	0,059	0,385	0,326	0,041	0,378	0,337	0,029	0,365	0,336
	0,6	0,161	0,483	0,321	0,079	0,464	0,385	0,050	0,438	0,387	0,034	0,410	0,376	0,023	0,382	0,359
	0,7	0,121	0,583	0,462	0,063	0,528	0,465	0,043	0,480	0,437	0,029	0,437	0,409	0,016	0,399	0,383
	0,8	0,097	0,667	0,570	0,055	0,589	0,534	0,037	0,526	0,490	0,023	0,473	0,449	0,009	0,427	0,417
	0,9	0,082	0,786	0,705	0,049	0,691	0,642	0,032	0,615	0,583	0,018	0,552	0,534	0,002	0,499	0,498
60	0,1	-	-	-	-	-	-	0,089	0,340	0,251	0,052	0,455	0,403	0,037	0,530	0,492
	0,2	-	-	-	0,172	0,308	0,136	0,069	0,442	0,373	0,046	0,512	0,465	0,033	0,558	0,524
	0,3	-	-	-	0,104	0,467	0,363	0,058	0,523	0,466	0,041	0,557	0,516	0,029	0,576	0,547
	0,4	0,156	0,541	0,385	0,078	0,572	0,495	0,050	0,585	0,535	0,035	0,589	0,554	0,024	0,584	0,560
	0,5	0,116	0,664	0,548	0,062	0,647	0,585	0,044	0,627	0,584	0,030	0,605	0,575	0,018	0,581	0,562
	0,6	0,091	0,743	0,652	0,054	0,692	0,638	0,037	0,648	0,610	0,025	0,606	0,581	0,012	0,565	0,554
	0,7	0,076	0,788	0,712	0,048	0,714	0,666	0,032	0,651	0,619	0,020	0,595	0,575	0,004	0,543	0,539
	0,8	0,069	0,788	0,712	0,048	0,714	0,666	0,032	0,651	0,619	0,020	0,595	0,575	0,004	0,543	0,539
80	0,1	-	-	-	0,113	0,467	0,354	0,058	0,611	0,553	0,041	0,717	0,676	0,030	0,800	0,770
	0,2	0,190	0,469	0,280	0,083	0,607	0,524	0,052	0,698	0,645	0,037	0,766	0,729	0,027	0,818	0,792
	0,3	0,132	0,656	0,524	0,068	0,720	0,652	0,047	0,766	0,720	0,033	0,800	0,767	0,023	0,823	0,800
	0,4	0,101	0,792	0,691	0,058	0,807	0,749	0,041	0,815	0,774	0,029	0,817	0,788	0,018	0,813	0,795
	0,5	0,082	0,889	0,807	0,051	0,863	0,812	0,036	0,839	0,803	0,024	0,814	0,790	0,012	0,786	0,774
	0,6	0,069	0,943	0,873	0,045	0,885	0,840	0,031	0,835	0,804	0,019	0,788	0,769	0,005	0,741	0,737
100	0,1	0,169	0,511	0,342	0,075	0,699	0,625	0,049	0,842	0,793	0,034	0,958	0,923	0,025	1,053	1,028



	0,2	0,122	0,715	0,593	0,063	0,831	0,768	0,044	0,925	0,880	0,031	1,002	0,970	0,022	1,064	1,042
	0,3	0,095	0,876	0,780	0,056	0,937	0,881	0,040	0,987	0,948	0,028	1,027	0,998	0,018	1,056	1,038
	0,4	0,078	1,001	0,923	0,050	1,016	0,966	0,035	1,026	0,991	0,025	1,031	1,006	0,013	1,029	1,015
	0,5	0,067	1,086	1,019	0,045	1,060	1,015	0,032	1,036	1,004	0,020	1,010	0,989	0,007	0,981	0,973
150	0,1	0,082	0,982	0,900	0,051	1,180	1,129	0,036	1,353	1,317	0,026	1,500	1,474	0,017	1,623	1,606
	0,2	0,071	1,180	1,109	0,047	1,315	1,269	0,034	1,434	1,400	0,024	1,535	1,511	0,014	1,618	1,604
	0,3	0,062	1,341	1,278	0,043	1,420	1,376	0,031	1,487	1,456	0,021	1,542	1,521	0,010	1,585	1,575
	0,4	0,057	1,461	1,405	0,039	1,487	1,448	0,028	1,507	1,479	0,018	1,519	1,501	0,006	1,524	1,518
200	0,1	0,060	1,368	1,308	0,041	1,601	1,560	0,030	1,805	1,775	0,021	1,979	1,958	0,012	2,126	2,114
	0,2	0,056	1,582	1,526	0,039	1,746	1,707	0,028	1,889	1,860	0,019	2,010	1,991	0,009	2,113	2,104
	0,3	0,052	1,754	1,701	0,036	1,853	1,817	0,026	1,937	1,911	0,017	2,007	1,990	0,005	2,063	2,058
300	0,1	0,045	2,047	2,001	0,032	2,343	2,311	0,024	2,599	2,575	0,016	2,818	2,802	0,006	3,002	2,995
	0,2	0,043	2,301	2,258	0,031	2,517	2,486	0,022	2,703	2,681	0,014	2,862	2,848	0,003	2,995	2,993

### Parâmetros Geométricos $H_2/H_1$ e $H_3/H_1$

Tabela 15 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) para os parâmetros geométricos  $H_2/H_1$  e  $H_3/H_1$  em função do número de Reynolds e da fração de caudal  $\beta$

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$H_2/H_1 = 0,75$			$H_3/H_1 = 0,50$			$H_3/H_1 = 0,75$		
		$\frac{x_{r_{vi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vT}}}{H_1}$
1	0,9	0,113	0,310	0,197	-	-	-	-	-	-
2	0,9	0,105	0,322	0,217	-	-	-	-	-	-
3	0,9	0,096	0,333	0,237	-	-	-	-	-	-
4	0,9	0,090	0,344	0,254	-	-	-	-	-	-
5	0,9	0,084	0,354	0,270	-	-	-	-	-	-
10	0,9	0,064	0,401	0,337	-	-	-	0,085	0,198	0,114

20	0,7	0,082	0,198	0,117	-	-	-	-	-	-
	0,8	0,057	0,315	0,258	-	-	-	-	-	-
	0,9	0,046	0,471	0,425	-	-	-	0,054	0,274	0,220
40	0,4	0,076	0,275	0,199	-	-	-	-	-	-
	0,5	0,059	0,342	0,283	-	-	-	-	-	-
	0,6	0,049	0,389	0,341	-	-	-	-	-	-
	0,7	0,042	0,428	0,386	-	-	-	0,061	0,193	0,131
	0,8	0,035	0,472	0,436	-	-	-	0,047	0,262	0,215
	0,9	0,030	0,558	0,528	0,062	0,096	0,033	0,035	0,354	0,319
60	0,1	0,089	0,332	0,243	-	-	-	-	-	-
	0,2	0,070	0,417	0,347	-	-	-	-	-	-
	0,3	0,058	0,483	0,424	-	-	-	-	-	-
	0,4	0,050	0,534	0,484	-	-	-	-	-	-
	0,5	0,043	0,568	0,525	-	-	-	0,069	0,236	0,167
	0,6	0,037	0,585	0,548	-	-	-	0,053	0,293	0,240
	0,7	0,031	0,586	0,555	-	-	-	0,043	0,331	0,288
	0,8	0,026	0,585	0,559	-	-	-	0,034	0,359	0,325
	0,9	0,022	0,619	0,597	0,041	0,149	0,108	0,027	0,408	0,382
80	0,1	0,059	0,599	0,539	-	-	-	-	-	-
	0,2	0,052	0,662	0,610	-	-	-	0,105	0,191	0,086
	0,3	0,047	0,713	0,666	-	-	-	0,073	0,279	0,206
	0,4	0,041	0,748	0,707	-	-	-	0,059	0,341	0,283
	0,5	0,036	0,765	0,729	-	-	-	0,051	0,391	0,340
	0,6	0,031	0,759	0,729	-	-	-	0,042	0,425	0,383
	0,7	0,026	0,730	0,705	-	-	-	0,034	0,441	0,407
	0,8	0,021	0,688	0,667	0,053	0,131	0,078	0,028	0,442	0,414

	0,9	0,017	0,671	0,654	0,032	0,186	0,154	0,021	0,454	0,433
100	0,1	0,049	0,824	0,775	-	-	-	0,070	0,308	0,237
	0,2	0,045	0,881	0,836	-	-	-	0,060	0,375	0,316
	0,3	0,041	0,921	0,880	-	-	-	0,054	0,433	0,379
	0,4	0,036	0,945	0,909	-	-	-	0,049	0,482	0,433
	0,5	0,031	0,948	0,917	-	-	-	0,043	0,520	0,478
	0,6	0,027	0,923	0,896	-	-	-	0,036	0,543	0,507
	0,7	0,022	0,867	0,844	0,058	0,145	0,087	0,030	0,542	0,512
	0,8	0,018	0,788	0,770	0,041	0,185	0,144	0,024	0,519	0,495
	0,9	0,014	0,720	0,707	0,026	0,216	0,190	0,017	0,496	0,479
150	0,1	0,038	1,324	1,286	0,072	0,140	0,068	0,045	0,637	0,592
	0,2	0,035	1,369	1,334	0,064	0,170	0,105	0,042	0,698	0,655
	0,3	0,032	1,392	1,359	0,059	0,196	0,136	0,039	0,747	0,708
	0,4	0,029	1,393	1,364	0,056	0,219	0,163	0,036	0,785	0,749
	0,5	0,025	1,365	1,340	0,052	0,242	0,190	0,032	0,809	0,777
	0,6	0,021	1,298	1,276	0,047	0,265	0,218	0,028	0,810	0,782
	0,7	0,017	1,182	1,165	0,039	0,286	0,247	0,024	0,776	0,752
	0,8	0,013	1,021	1,009	0,030	0,295	0,265	0,018	0,699	0,681
	0,9	0,008	0,842	0,834	0,018	0,283	0,265	0,012	0,597	0,586
200	0,1	0,032	1,767	1,735	0,046	0,302	0,255	0,035	0,912	0,877
	0,2	0,030	1,805	1,776	0,045	0,327	0,282	0,034	0,975	0,941
	0,3	0,028	1,816	1,788	0,044	0,348	0,305	0,032	1,022	0,990
	0,4	0,025	1,800	1,775	0,042	0,366	0,324	0,030	1,056	1,026
	0,5	0,022	1,748	1,727	0,039	0,381	0,341	0,027	1,070	1,043
	0,6	0,018	1,644	1,626	0,036	0,393	0,357	0,024	1,054	1,030
	0,7	0,014	1,473	1,460	0,031	0,401	0,370	0,020	0,990	0,970

	0,8	0,009	1,237	1,228	0,024	0,392	0,367	0,015	0,866	0,851
	0,9	0,005	0,961	0,956	0,014	0,345	0,331	0,009	0,695	0,686
300	0,1	0,025	2,546	2,521	0,032	0,547	0,515	0,028	1,393	1,366
	0,2	0,024	2,587	2,563	0,032	0,575	0,544	0,026	1,462	1,436
	0,3	0,022	2,590	2,568	0,031	0,596	0,565	0,025	1,513	1,488
	0,4	0,020	2,556	2,536	0,030	0,610	0,580	0,023	1,544	1,520
	0,5	0,017	2,468	2,451	0,029	0,618	0,588	0,021	1,547	1,526
	0,6	0,013	2,299	2,285	0,027	0,619	0,592	0,019	1,504	1,485
	0,7	0,009	2,025	2,016	0,024	0,610	0,586	0,015	1,386	1,371
	0,8	0,005	1,642	1,637	0,019	0,570	0,551	0,010	1,175	1,165
	0,9	0,000	1,178	1,178	0,009	0,462	0,453	0,005	0,875	0,871

### Parâmetro Geométrico $E/H_1$

Tabela 16 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) para o parâmetro geométrico  $E/H_1$  (e para  $z/E = 0,50$ ) em função do número de Reynolds e da fração de caudal  $\beta$

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$E/H_1 = 0,25$			$E/H_1 = 0,50$			$E/H_1 = 0,75$			$E/H_1 = 1$			$E/H_1 = 2$		
		$\frac{x_{r_{vi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{vT}}}{H_1}$
3	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,180	0,295	0,115
4	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,145	0,338	0,194
5	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,122	0,368	0,246
10	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,109	0,280	0,171
	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,082	0,315	0,233	0,084	0,464	0,379
20	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,120	0,126	0,006	0,105	0,245	0,140
	0,6	-	-	-	-	-	-	0,098	0,128	0,030	0,077	0,205	0,129	0,087	0,312	0,225
	0,7	-	-	-	-	-	-	0,070	0,201	0,131	0,065	0,278	0,213	0,072	0,378	0,307

	0,8	-	-	-	0,075	0,119	0,044	0,060	0,284	0,225	0,055	0,363	0,308	0,062	0,453	0,391
	0,9	-	-	-	0,059	0,209	0,150	0,050	0,406	0,356	0,047	0,486	0,438	0,053	0,568	0,515
40	0,1	0,055	0,072	0,017	0,056	0,129	0,072	0,062	0,189	0,127	0,063	0,243	0,180	0,080	0,370	0,290
	0,2	0,052	0,075	0,023	0,053	0,144	0,091	0,057	0,209	0,151	0,058	0,265	0,207	0,071	0,401	0,330
	0,3	0,049	0,078	0,029	0,050	0,163	0,113	0,053	0,233	0,180	0,052	0,291	0,239	0,065	0,433	0,367
	0,4	0,047	0,090	0,043	0,046	0,189	0,143	0,048	0,263	0,215	0,048	0,323	0,274	0,059	0,466	0,407
	0,5	0,044	0,102	0,059	0,042	0,225	0,183	0,044	0,303	0,259	0,044	0,363	0,318	0,053	0,504	0,451
	0,6	0,041	0,121	0,081	0,039	0,273	0,234	0,041	0,355	0,315	0,040	0,414	0,373	0,047	0,545	0,499
	0,7	0,038	0,145	0,108	0,036	0,329	0,294	0,037	0,421	0,385	0,036	0,477	0,441	0,040	0,587	0,547
	0,8	0,035	0,172	0,137	0,033	0,390	0,357	0,033	0,495	0,463	0,032	0,546	0,515	0,034	0,625	0,592
	0,9	0,032	0,203	0,171	0,030	0,462	0,432	0,029	0,574	0,545	0,027	0,621	0,593	0,028	0,681	0,654
60	0,1	0,029	0,149	0,120	0,035	0,244	0,209	0,041	0,321	0,280	0,043	0,392	0,349	0,056	0,574	0,518
	0,2	0,029	0,161	0,132	0,034	0,261	0,227	0,039	0,338	0,299	0,041	0,409	0,368	0,052	0,593	0,541
	0,3	0,028	0,177	0,149	0,033	0,283	0,251	0,037	0,359	0,322	0,038	0,430	0,392	0,047	0,612	0,565
	0,4	0,028	0,200	0,173	0,031	0,314	0,283	0,035	0,387	0,352	0,035	0,457	0,421	0,042	0,635	0,592
	0,5	0,027	0,228	0,202	0,029	0,354	0,325	0,032	0,424	0,392	0,032	0,492	0,460	0,037	0,664	0,626
	0,6	0,026	0,257	0,231	0,027	0,403	0,375	0,029	0,473	0,444	0,029	0,539	0,511	0,031	0,698	0,667
	0,7	0,024	0,283	0,258	0,025	0,457	0,432	0,026	0,536	0,511	0,025	0,599	0,574	0,026	0,731	0,705
	0,8	0,023	0,304	0,281	0,023	0,516	0,494	0,022	0,610	0,587	0,021	0,662	0,641	0,020	0,747	0,727
	0,9	0,022	0,330	0,308	0,020	0,572	0,552	0,019	0,667	0,649	0,017	0,705	0,688	0,014	0,758	0,743
80	0,1	0,023	0,227	0,204	0,028	0,347	0,318	0,033	0,434	0,401	0,035	0,519	0,484	0,046	0,737	0,691
	0,2	0,023	0,244	0,221	0,027	0,363	0,335	0,032	0,447	0,416	0,033	0,531	0,498	0,042	0,746	0,704
	0,3	0,022	0,265	0,243	0,026	0,383	0,357	0,030	0,465	0,435	0,031	0,547	0,517	0,038	0,757	0,718
	0,4	0,022	0,290	0,269	0,025	0,410	0,385	0,027	0,489	0,461	0,028	0,570	0,542	0,033	0,771	0,738
	0,5	0,021	0,318	0,297	0,023	0,445	0,422	0,025	0,522	0,497	0,025	0,601	0,576	0,028	0,794	0,766
	0,6	0,020	0,345	0,325	0,021	0,487	0,466	0,022	0,566	0,544	0,022	0,645	0,623	0,023	0,825	0,803

	0,7	0,018	0,367	0,349	0,019	0,539	0,520	0,019	0,625	0,606	0,018	0,703	0,685	0,017	0,853	0,836
	0,8	0,017	0,384	0,367	0,016	0,601	0,584	0,016	0,698	0,682	0,014	0,761	0,747	0,011	0,852	0,841
	0,9	0,016	0,402	0,387	0,014	0,655	0,641	0,012	0,745	0,733	0,010	0,779	0,769	0,005	0,822	0,817
100	0,1	0,020	0,298	0,279	0,024	0,442	0,418	0,029	0,539	0,510	0,030	0,636	0,606	0,040	0,883	0,843
	0,2	0,019	0,315	0,295	0,023	0,454	0,431	0,027	0,548	0,521	0,028	0,644	0,615	0,036	0,881	0,845
	0,3	0,019	0,334	0,316	0,022	0,469	0,448	0,025	0,562	0,537	0,026	0,655	0,629	0,032	0,883	0,851
	0,4	0,018	0,357	0,339	0,021	0,490	0,470	0,023	0,581	0,559	0,023	0,673	0,649	0,028	0,890	0,862
	0,5	0,017	0,382	0,365	0,019	0,519	0,500	0,020	0,610	0,590	0,020	0,700	0,680	0,022	0,906	0,884
	0,6	0,016	0,406	0,391	0,017	0,556	0,539	0,017	0,650	0,633	0,017	0,741	0,724	0,017	0,934	0,918
	0,7	0,014	0,426	0,412	0,015	0,604	0,590	0,014	0,707	0,692	0,013	0,799	0,786	0,011	0,960	0,950
	0,8	0,013	0,441	0,428	0,012	0,667	0,655	0,011	0,778	0,768	0,009	0,855	0,846	0,004	0,947	0,943
	0,9	0,011	0,454	0,442	0,010	0,726	0,716	0,007	0,816	0,809	0,005	0,850	0,844	0,000	0,882	0,882
150	0,1	0,015	0,446	0,431	0,019	0,646	0,627	0,023	0,769	0,747	0,024	0,887	0,863	0,032	1,197	1,165
	0,2	0,015	0,454	0,440	0,018	0,651	0,633	0,021	0,775	0,754	0,022	0,886	0,864	0,029	1,173	1,144
	0,3	0,014	0,465	0,451	0,016	0,656	0,640	0,019	0,783	0,764	0,020	0,889	0,870	0,025	1,151	1,126
	0,4	0,013	0,477	0,465	0,015	0,665	0,650	0,017	0,795	0,778	0,017	0,899	0,882	0,020	1,135	1,115
	0,5	0,012	0,493	0,481	0,013	0,680	0,667	0,014	0,815	0,801	0,014	0,919	0,906	0,014	1,131	1,117
	0,6	0,010	0,510	0,500	0,010	0,706	0,696	0,010	0,848	0,837	0,010	0,956	0,946	0,008	1,146	1,138
	0,7	0,008	0,526	0,518	0,008	0,748	0,741	0,006	0,899	0,892	0,005	1,013	1,008	0,000	1,172	1,171
	0,8	0,006	0,540	0,534	0,005	0,812	0,807	0,002	0,969	0,966	0,001	1,073	1,073	0,000	1,152	1,152
	0,9	0,004	0,553	0,549	0,002	0,882	0,880	0,000	0,986	0,986	0,000	1,021	1,021	0,000	1,021	1,021

## Escoamento separado Horizontal

Caso Base e Parâmetro Geométrico  $\theta$ Tabela 17 – Comprimentos de escoamento separado horizontal (adimensionais) para o parâmetro geométrico  $\theta$  em função do número de Reynolds e da fração de caudal  $\beta$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$\theta = 70^\circ$			$\theta = 80^\circ$			$\theta = 90^\circ$ (Caso Base)			$\theta = 100^\circ$			$\theta = 110^\circ$		
		$\frac{x_{r_{hi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hT}}}{H_1}$
60	0,1	-0,237	0,288	0,525	-0,246	0,283	0,529	-0,268	0,265	0,533	-0,308	0,230	0,538	-0,373	0,173	0,545
80	0,1	-0,368	0,388	0,756	-0,373	0,382	0,755	-0,395	0,362	0,757	-0,435	0,326	0,762	-0,502	0,267	0,769
	0,2	-0,259	0,282	0,541	-0,268	0,279	0,547	-0,292	0,260	0,553	-0,336	0,224	0,560	-0,406	0,166	0,572
	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,162	-0,068	0,094
100	0,1	-0,456	0,466	0,922	-0,459	0,458	0,918	-0,479	0,438	0,917	-0,520	0,400	0,920	-0,587	0,337	0,925
	0,2	-0,368	0,422	0,790	-0,374	0,416	0,790	-0,397	0,395	0,792	-0,440	0,357	0,797	-0,511	0,293	0,804
	0,3	-0,224	0,306	0,531	-0,237	0,306	0,542	-0,263	0,289	0,552	-0,310	0,254	0,564	-0,387	0,197	0,584
150	0,1	-0,604	0,630	1,234	-0,602	0,621	1,223	-0,619	0,599	1,218	-0,659	0,557	1,215	-0,727	0,485	1,211
	0,2	-0,532	0,693	1,225	-0,533	0,685	1,217	-0,553	0,661	1,214	-0,596	0,615	1,211	-0,667	0,540	1,207
	0,3	-0,433	0,668	1,101	-0,439	0,662	1,101	-0,462	0,639	1,102	-0,507	0,596	1,103	-0,582	0,525	1,106
	0,4	-0,284	0,494	0,778	-0,296	0,494	0,790	-0,323	0,476	0,799	-0,371	0,438	0,809	-0,449	0,377	0,826
200	0,1	-0,700	0,778	1,478	-0,695	0,768	1,462	-0,711	0,743	1,453	-0,750	0,696	1,446	-0,818	0,614	1,433
	0,2	-0,634	0,930	1,564	-0,633	0,919	1,552	-0,652	0,892	1,544	-0,694	0,841	1,536	-0,765	0,755	1,520
	0,3	-0,549	0,962	1,511	-0,551	0,954	1,505	-0,574	0,928	1,502	-0,618	0,879	1,497	-0,692	0,797	1,489
	0,4	-0,431	0,825	1,256	-0,439	0,821	1,260	-0,464	0,799	1,263	-0,511	0,755	1,265	-0,587	0,682	1,268
	0,5	-0,242	0,519	0,761	-0,257	0,521	0,778	-0,286	0,505	0,790	-0,335	0,469	0,804	-0,414	0,410	0,825
300	0,1	-0,826	1,042	1,868	-0,818	1,030	1,848	-0,833	1,001	1,834	-0,872	0,946	1,818	-0,941	0,844	1,786

0,2	-0,767	1,364	2,131	-0,763	1,351	2,114	-0,781	1,319	2,100	-0,824	1,259	2,083	-0,895	1,153	2,048
0,3	-0,693	1,506	2,200	-0,693	1,495	2,188	-0,714	1,465	2,179	-0,759	1,408	2,167	-0,832	1,310	2,142
0,4	-0,597	1,410	2,007	-0,601	1,402	2,003	-0,624	1,376	2,000	-0,670	1,325	1,995	-0,745	1,238	1,984
0,5	-0,463	1,090	1,552	-0,471	1,087	1,557	-0,496	1,065	1,561	-0,542	1,021	1,563	-0,618	0,947	1,565
0,6	-0,236	0,630	0,866	-0,251	0,633	0,884	-0,279	0,618	0,896	-0,326	0,583	0,909	-0,402	0,525	0,928

### Parâmetros Geométricos $H_2/H_1$ e $H_3/H_1$

Tabela 18 – Comprimentos de escoamento separado horizontal (adimensionais) para os parâmetros geométricos  $H_2/H_1$  e  $H_3/H_1$  em função do número de Reynolds e da fração de caudal  $\beta$

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$H_2/H_1 = 0,75$			$H_3/H_1 = 0,50$			$H_3/H_1 = 0,75$		
		$\frac{x_{r_{hi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hT}}}{H_1}$
60	0,1	-	-	-	-0,029	0,471	0,500	-0,150	0,366	0,517
60	0,2	-	-	-	0,159	0,226	0,066	-	-	-
80	0,1	-0,357	-0,050	0,308	-0,131	0,564	0,696	-0,263	0,460	0,723
80	0,2	-	-	-	-0,053	0,471	0,524	-0,175	0,364	0,538
80	0,3	-	-	-	0,152	0,258	0,106	-	-	-
100	0,1	-0,460	0,029	0,489	-0,201	0,638	0,839	-0,340	0,534	0,874
100	0,2	-	-	-	-0,140	0,601	0,741	-0,270	0,495	0,765
100	0,3	-	-	-	-0,039	0,507	0,546	-0,155	0,395	0,550
150	0,1	-0,606	0,149	0,755	-0,320	0,796	1,116	-0,469	0,693	1,162
150	0,2	-0,503	0,068	0,570	-0,274	0,863	1,137	-0,415	0,758	1,173
150	0,3	-	-	-	-0,209	0,847	1,056	-0,339	0,740	1,078
150	0,4	-	-	-	-0,105	0,692	0,796	-0,219	0,580	0,800
200	0,1	-0,700	0,241	0,941	-0,402	0,938	1,340	-0,556	0,837	1,393
200	0,2	-0,613	0,207	0,820	-0,362	1,094	1,456	-0,508	0,991	1,499



200	0,3	-0,464	0,019	0,484	-0,307	1,135	1,442	-0,443	1,029	1,472
200	0,4	-	-	-	-0,227	1,010	1,237	-0,350	0,901	1,251
200	0,5	-	-	-	-0,092	0,718	0,809	-0,195	0,608	0,803
300	0,1	-0,824	0,397	1,221	-0,514	1,196	1,710	-0,671	1,098	1,769
300	0,2	-0,751	0,434	1,185	-0,479	1,522	2,001	-0,629	1,421	2,050
300	0,3	-0,641	0,268	0,909	-0,432	1,673	2,105	-0,574	1,568	2,142
300	0,4	-0,431	-0,044	0,387	-0,369	1,588	1,957	-0,499	1,480	1,979
300	0,5	-	-	-	-0,274	1,275	1,549	-0,389	1,167	1,557
300	0,6	-	-	-	-0,106	0,818	0,924	-0,199	0,715	0,915

### Parâmetro Geométrico $E/H_1$

Tabela 19 – Comprimentos de escoamento separado vertical (adimensionais) para o parâmetro geométrico  $E/H_1$  (e para  $z/E = 0,50$ ) em função do número de Reynolds e da fração de caudal  $\beta$

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$E/H_1 = 0,25$			$E/H_1 = 0,50$			$E/H_1 = 0,75$			$E/H_1 = 1$			$E/H_1 = 2$		
		$\frac{x_{r_{hi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hT}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hi}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hf}}}{H_1}$	$\frac{x_{r_{hT}}}{H_1}$
40	0,1	-	-	-	-	-	-	-0,104	0,217	0,321	-0,211	0,475	0,686	-0,028	0,610	0,637
	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,066	0,187	0,121	-	-	-
60	0,1	-	-	-	-	-	-	-0,405	0,627	1,032	-0,395	0,818	1,213	-0,155	1,015	1,169
	0,2	-	-	-	-	-	-	-0,283	0,484	0,767	-0,281	0,741	1,022	0,046	0,887	0,842
	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,078	0,467	0,545	-	-	-
80	0,1	-	-	-	-0,441	0,491	0,932	-0,529	0,930	1,459	-0,491	1,101	1,591	-0,276	1,318	1,594
	0,2	-	-	-	-0,306	0,279	0,585	-0,439	0,860	1,299	-0,397	1,105	1,502	-0,111	1,301	1,412
	0,3	-	-	-	-	-	-	-0,304	0,592	0,896	-0,261	0,898	1,159	0,188	1,020	0,832
	0,4	-	-	-	-	-	-	0,042	0,149	0,107	0,004	0,472	0,468	-	-	-
100	0,1	-	-	-	-0,576	0,804	1,380	-0,604	1,196	1,800	-0,552	1,330	1,882	-0,397	1,547	1,944

	0,2	-	-	-	-0,484	0,615	1,100	-0,526	1,198	1,724	-0,467	1,422	1,889	-0,243	1,638	1,881
	0,3	-	-	-	-0,338	0,358	0,697	-0,417	0,917	1,334	-0,351	1,261	1,612	-0,010	1,483	1,493
	0,4	-	-	-	-	-	-	-0,243	0,578	0,821	-0,171	0,869	1,039	-	-	-
150	0,1	-0,469	0,171	0,640	-0,743	1,471	2,213	-0,707	1,681	2,388	-0,649	1,685	2,334	-0,620	1,890	2,510
	0,2	-	-	-	-0,675	1,354	2,029	-0,642	1,917	2,559	-0,571	2,047	2,618	-0,492	2,246	2,739
	0,3	-	-	-	-0,582	0,978	1,559	-0,555	1,691	2,246	-0,471	2,035	2,505	-0,290	2,338	2,627
	0,4	-	-	-	-0,445	0,670	1,115	-0,432	1,208	1,640	-0,334	1,672	2,006	0,001	2,001	2,000
	0,5	-	-	-	-0,183	0,296	0,479	-0,237	0,784	1,021	-0,119	1,079	1,197	-	-	-

## Anexo B – Coeficientes de Perda de Carga

### Caso Base e Parâmetro Geométrico $\theta$

Tabela 20 – Coeficientes de perda de carga para o parâmetro geométrico  $\theta$  em função do número de Reynolds e da fração de caudal  $\beta$

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$\theta = 70^\circ$			$\theta = 80^\circ$			$\theta = 90^\circ$ (Caso Base)			$\theta = 100^\circ$			$\theta = 110^\circ$		
		$K_{12}$	$K_{13}$	$K$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K$
1	0,1	18,760	29,250	28,201	18,896	31,211	29,979	19,553	32,632	31,324	20,648	33,469	32,187	22,122	33,601	32,453
	0,2	20,828	27,885	26,474	20,827	29,692	27,919	21,380	31,072	29,133	22,410	31,974	30,061	23,865	32,284	30,600
	0,3	22,909	26,534	25,446	22,769	28,183	26,559	23,215	29,519	27,628	24,176	30,484	28,591	25,609	30,967	29,360
	0,4	25,004	25,196	25,119	24,722	26,686	25,900	25,058	27,974	26,807	25,946	28,998	27,777	27,354	29,652	28,733
	0,5	27,112	23,872	25,492	26,686	25,199	25,942	26,908	26,436	26,672	27,722	27,516	27,619	29,101	28,337	28,719
	0,6	29,234	22,560	26,564	28,660	23,722	26,685	28,766	24,906	27,222	29,501	26,039	28,116	30,849	27,023	29,319
	0,7	31,370	21,263	28,337	30,646	22,256	28,129	30,632	23,383	28,457	31,285	24,565	29,269	32,599	25,711	30,532
	0,8	33,518	19,978	30,810	32,641	20,800	30,273	32,506	21,867	30,379	33,074	23,095	31,078	34,349	24,398	32,359
	0,9	35,681	18,707	33,984	34,648	19,355	33,119	34,388	20,359	32,985	34,867	21,630	33,543	36,101	23,086	34,799
2	0,1	9,320	14,649	14,116	9,320	15,638	15,006	9,586	16,359	15,681	10,075	16,787	16,115	10,759	16,862	16,251
	0,2	10,335	13,979	13,250	10,279	14,898	13,974	10,505	15,603	14,584	10,974	16,069	15,050	11,660	16,236	15,321
	0,3	11,363	13,323	12,735	11,249	14,168	13,292	11,432	14,855	13,828	11,877	15,355	14,312	12,563	15,611	14,697
	0,4	12,404	12,679	12,569	12,230	13,449	12,961	12,367	14,114	13,416	12,786	14,645	13,902	13,468	14,988	14,380
	0,5	13,459	12,050	12,754	13,220	12,739	12,980	13,310	13,381	13,346	13,699	13,940	13,820	14,376	14,366	14,371
	0,6	14,526	11,433	13,289	14,222	12,041	13,350	14,261	12,655	13,619	14,617	13,239	14,066	15,284	13,745	14,668
	0,7	15,608	10,829	14,174	15,234	11,352	14,070	15,220	11,936	14,235	15,540	12,542	14,641	16,194	13,123	15,273
	0,8	16,703	10,237	15,409	16,258	10,673	15,141	16,186	11,224	15,194	16,468	11,848	15,544	17,105	12,503	16,185

	0,9	17,811	9,658	16,996	17,292	10,003	16,563	17,160	10,518	16,496	17,400	11,157	16,775	18,018	11,882	17,404
3	0,1	6,170	9,790	9,428	6,128	10,456	10,024	6,265	10,944	10,476	6,554	11,237	10,769	6,976	11,294	10,862
	0,2	6,835	9,351	8,848	6,763	9,975	9,333	6,881	10,456	9,741	7,164	10,777	10,054	7,596	10,897	10,237
	0,3	7,513	8,927	8,502	7,409	9,505	8,876	7,506	9,976	9,235	7,779	10,321	9,559	8,218	10,503	9,817
	0,4	8,204	8,515	8,390	8,065	9,044	8,653	8,138	9,503	8,957	8,400	9,870	9,282	8,842	10,110	9,602
	0,5	8,907	8,117	8,512	8,732	8,594	8,663	8,778	9,038	8,908	9,026	9,424	9,225	9,468	9,718	9,593
	0,6	9,625	7,731	8,867	9,410	8,154	8,908	9,427	8,580	9,088	9,657	8,981	9,386	10,096	9,327	9,788
	0,7	10,355	7,357	9,455	10,099	7,724	9,386	10,083	8,128	9,496	10,293	8,542	9,768	10,727	8,936	10,189
	0,8	11,099	6,996	10,278	10,798	7,303	10,099	10,747	7,682	10,134	10,933	8,106	10,368	11,358	8,545	10,796
	0,9	11,856	6,646	11,335	11,508	6,890	11,047	11,419	7,242	11,002	11,579	7,672	11,188	11,992	8,154	11,608
4	0,1	4,594	7,365	7,088	4,532	7,872	7,538	4,607	8,244	7,880	4,797	8,470	8,102	5,090	8,519	8,176
	0,2	5,085	7,043	6,651	5,006	7,520	7,017	5,071	7,889	7,326	5,262	8,138	7,563	5,567	8,236	7,702
	0,3	5,588	6,734	6,390	5,489	7,179	6,672	5,543	7,543	6,943	5,733	7,811	7,188	6,047	7,955	7,383
	0,4	6,103	6,439	6,304	5,984	6,848	6,502	6,024	7,204	6,732	6,209	7,489	6,977	6,530	7,677	7,218
	0,5	6,632	6,156	6,394	6,489	6,528	6,508	6,513	6,872	6,693	6,690	7,172	6,931	7,016	7,400	7,208
	0,6	7,174	5,885	6,658	7,004	6,217	6,689	7,010	6,548	6,825	7,177	6,858	7,050	7,503	7,124	7,352
	0,7	7,729	5,626	7,098	7,531	5,915	7,046	7,515	6,229	7,129	7,670	6,548	7,333	7,994	6,848	7,650
	0,8	8,298	5,379	7,714	8,069	5,623	7,580	8,028	5,917	7,606	8,167	6,240	7,782	8,486	6,572	8,103
	0,9	8,880	5,143	8,506	8,617	5,338	8,290	8,550	5,609	8,256	8,670	5,935	8,396	8,980	6,296	8,711
5	0,1	3,648	5,915	5,688	3,576	6,325	6,050	3,614	6,629	6,327	3,747	6,815	6,508	3,963	6,860	6,570
	0,2	4,034	5,662	5,337	3,952	6,051	5,631	3,986	6,354	5,881	4,123	6,560	6,073	4,353	6,645	6,187
	0,3	4,432	5,423	5,126	4,338	5,788	5,353	4,367	6,088	5,572	4,506	6,310	5,769	4,747	6,433	5,927
	0,4	4,843	5,197	5,055	4,735	5,535	5,215	4,757	5,829	5,400	4,895	6,066	5,597	5,144	6,223	5,791
	0,5	5,267	4,983	5,125	5,143	5,292	5,218	5,154	5,578	5,366	5,290	5,825	5,557	5,545	6,015	5,780
	0,6	5,703	4,782	5,335	5,561	5,059	5,360	5,560	5,333	5,469	5,690	5,589	5,650	5,948	5,807	5,892
	0,7	6,154	4,592	5,685	5,991	4,835	5,644	5,975	5,095	5,711	6,096	5,356	5,874	6,354	5,601	6,128

	0,8	6,617	4,413	6,177	6,432	4,619	6,069	6,398	4,862	6,091	6,508	5,125	6,231	6,763	5,393	6,489
	0,9	7,095	4,245	6,810	6,884	4,410	6,636	6,829	4,633	6,609	6,925	4,896	6,722	7,173	5,185	6,974
10	0,1	1,765	3,040	2,913	1,682	3,263	3,105	1,657	3,433	3,256	1,683	3,547	3,360	1,753	3,589	3,406
	0,2	1,940	2,927	2,730	1,859	3,143	2,886	1,840	3,316	3,021	1,874	3,441	3,128	1,959	3,504	3,195
	0,3	2,127	2,828	2,618	2,046	3,036	2,739	2,031	3,209	2,856	2,073	3,343	2,962	2,171	3,424	3,048
	0,4	2,326	2,742	2,576	2,245	2,939	2,661	2,232	3,111	2,759	2,281	3,251	2,863	2,389	3,349	2,965
	0,5	2,539	2,669	2,604	2,455	2,853	2,654	2,443	3,021	2,732	2,496	3,166	2,831	2,613	3,278	2,945
	0,6	2,765	2,607	2,702	2,678	2,776	2,717	2,665	2,938	2,774	2,720	3,085	2,866	2,844	3,209	2,990
	0,7	3,005	2,556	2,870	2,913	2,707	2,851	2,896	2,860	2,885	2,952	3,007	2,969	3,079	3,141	3,098
	0,8	3,260	2,513	3,110	3,160	2,644	3,057	3,138	2,786	3,068	3,192	2,931	3,139	3,320	3,073	3,271
	0,9	3,529	2,479	3,424	3,419	2,586	3,336	3,390	2,714	3,323	3,438	2,855	3,380	3,565	3,001	3,509
20	0,1	0,887	1,642	1,566	0,820	1,780	1,684	0,783	1,898	1,786	0,771	1,989	1,867	0,781	2,046	1,920
	0,2	0,946	1,599	1,468	0,881	1,736	1,565	0,850	1,854	1,653	0,846	1,949	1,728	0,867	2,012	1,783
	0,3	1,015	1,574	1,406	0,953	1,708	1,482	0,926	1,825	1,555	0,929	1,921	1,624	0,961	1,989	1,681
	0,4	1,095	1,565	1,377	1,036	1,695	1,431	1,013	1,809	1,491	1,023	1,906	1,553	1,065	1,978	1,613
	0,5	1,191	1,570	1,381	1,134	1,693	1,413	1,114	1,804	1,459	1,131	1,900	1,515	1,181	1,976	1,578
	0,6	1,303	1,586	1,417	1,247	1,702	1,429	1,231	1,808	1,462	1,252	1,902	1,512	1,309	1,980	1,578
	0,7	1,433	1,612	1,487	1,377	1,717	1,479	1,363	1,817	1,499	1,387	1,908	1,543	1,450	1,988	1,611
	0,8	1,582	1,642	1,594	1,525	1,735	1,567	1,511	1,827	1,574	1,536	1,914	1,612	1,602	1,995	1,681
	0,9	1,748	1,675	1,741	1,689	1,754	1,696	1,673	1,835	1,689	1,698	1,917	1,720	1,765	1,996	1,788
40	0,1	0,607	0,969	0,933	0,567	1,083	1,031	0,542	1,194	1,129	0,527	1,299	1,222	0,521	1,391	1,304
	0,2	0,588	0,965	0,889	0,549	1,076	0,971	0,526	1,183	1,052	0,516	1,282	1,129	0,517	1,367	1,197
	0,3	0,571	0,985	0,861	0,533	1,093	0,925	0,513	1,194	0,990	0,507	1,286	1,052	0,515	1,362	1,108
	0,4	0,563	1,029	0,842	0,526	1,131	0,889	0,508	1,226	0,939	0,507	1,309	0,988	0,521	1,378	1,035
	0,5	0,571	1,090	0,831	0,535	1,187	0,861	0,519	1,274	0,897	0,522	1,350	0,936	0,543	1,412	0,978
	0,6	0,601	1,164	0,826	0,566	1,253	0,841	0,552	1,333	0,865	0,559	1,403	0,897	0,586	1,460	0,935

	0,7	0,656	1,244	0,832	0,622	1,325	0,833	0,611	1,398	0,847	0,621	1,461	0,873	0,653	1,514	0,911
	0,8	0,740	1,322	0,856	0,707	1,394	0,844	0,697	1,459	0,849	0,710	1,516	0,871	0,745	1,566	0,909
	0,9	0,853	1,391	0,906	0,820	1,452	0,883	0,811	1,509	0,880	0,824	1,560	0,897	0,860	1,607	0,935
60	0,1	0,613	0,754	0,739	0,587	0,868	0,840	0,570	0,990	0,948	0,559	1,114	1,059	0,553	1,237	1,169
	0,2	0,561	0,764	0,724	0,535	0,877	0,808	0,519	0,991	0,897	0,511	1,105	0,986	0,511	1,212	1,072
	0,3	0,503	0,807	0,716	0,477	0,914	0,783	0,463	1,018	0,852	0,458	1,118	0,920	0,462	1,210	0,985
	0,4	0,449	0,877	0,706	0,423	0,976	0,755	0,410	1,070	0,806	0,408	1,156	0,857	0,417	1,231	0,905
	0,5	0,409	0,967	0,688	0,383	1,058	0,721	0,372	1,141	0,756	0,373	1,214	0,793	0,386	1,275	0,830
	0,6	0,393	1,070	0,664	0,367	1,152	0,681	0,357	1,224	0,704	0,361	1,286	0,731	0,378	1,337	0,762
	0,7	0,408	1,176	0,638	0,383	1,248	0,642	0,374	1,311	0,655	0,380	1,365	0,675	0,402	1,408	0,704
	0,8	0,459	1,275	0,622	0,435	1,338	0,616	0,427	1,392	0,620	0,436	1,438	0,636	0,461	1,476	0,664
	0,9	0,549	1,356	0,630	0,526	1,409	0,614	0,519	1,454	0,612	0,528	1,494	0,625	0,555	1,529	0,652
80	0,1	0,660	0,650	0,651	0,641	0,770	0,758	0,629	0,904	0,876	0,621	1,047	1,004	0,617	1,194	1,136
	0,2	0,589	0,671	0,655	0,571	0,788	0,745	0,559	0,913	0,842	0,553	1,040	0,943	0,553	1,168	1,045
	0,3	0,506	0,728	0,661	0,487	0,838	0,733	0,477	0,949	0,808	0,473	1,059	0,883	0,477	1,163	0,957
	0,4	0,422	0,815	0,658	0,403	0,915	0,710	0,394	1,012	0,765	0,392	1,102	0,818	0,399	1,184	0,870
	0,5	0,351	0,923	0,637	0,332	1,012	0,672	0,323	1,094	0,709	0,323	1,167	0,745	0,333	1,230	0,781
	0,6	0,304	1,043	0,599	0,284	1,121	0,619	0,276	1,190	0,641	0,278	1,249	0,666	0,291	1,296	0,693
	0,7	0,291	1,164	0,552	0,271	1,231	0,559	0,264	1,288	0,571	0,268	1,336	0,589	0,285	1,374	0,611
	0,8	0,320	1,274	0,511	0,301	1,331	0,507	0,294	1,379	0,511	0,301	1,418	0,524	0,320	1,450	0,546
	0,9	0,395	1,362	0,492	0,376	1,408	0,480	0,371	1,447	0,479	0,378	1,480	0,489	0,399	1,509	0,510
100	0,1	0,710	0,591	0,603	0,696	0,719	0,716	0,687	0,863	0,846	0,681	1,022	0,988	0,678	1,189	1,138
	0,2	0,626	0,620	0,622	0,613	0,744	0,718	0,604	0,877	0,823	0,600	1,017	0,934	0,601	1,160	1,048
	0,3	0,526	0,688	0,639	0,512	0,802	0,715	0,504	0,920	0,795	0,501	1,037	0,876	0,505	1,151	0,957
	0,4	0,422	0,786	0,641	0,407	0,888	0,696	0,400	0,988	0,753	0,399	1,082	0,809	0,405	1,169	0,863
	0,5	0,329	0,906	0,617	0,313	0,995	0,654	0,306	1,077	0,691	0,306	1,150	0,728	0,315	1,214	0,764

	0,6	0,259	1,036	0,569	0,243	1,112	0,590	0,236	1,178	0,613	0,238	1,235	0,637	0,249	1,280	0,661
	0,7	0,225	1,165	0,507	0,208	1,229	0,514	0,202	1,283	0,526	0,206	1,327	0,542	0,219	1,361	0,562
	0,8	0,237	1,283	0,446	0,221	1,335	0,444	0,216	1,378	0,448	0,221	1,414	0,459	0,237	1,441	0,477
	0,9	0,302	1,375	0,409	0,286	1,416	0,399	0,281	1,451	0,398	0,287	1,479	0,407	0,305	1,503	0,425
150	0,1	0,815	0,522	0,551	0,807	0,667	0,681	0,802	0,835	0,831	0,799	1,021	0,999	0,798	1,221	1,179
	0,2	0,712	0,565	0,595	0,704	0,703	0,703	0,699	0,854	0,823	0,697	1,015	0,951	0,699	1,183	1,086
	0,3	0,585	0,649	0,630	0,576	0,773	0,714	0,571	0,902	0,803	0,570	1,033	0,894	0,574	1,164	0,987
	0,4	0,449	0,763	0,638	0,440	0,870	0,698	0,435	0,975	0,759	0,435	1,076	0,820	0,440	1,172	0,879
	0,5	0,321	0,897	0,609	0,311	0,986	0,649	0,306	1,069	0,687	0,307	1,143	0,725	0,313	1,208	0,761
	0,6	0,215	1,040	0,545	0,204	1,112	0,567	0,199	1,175	0,590	0,201	1,228	0,612	0,208	1,271	0,633
	0,7	0,146	1,180	0,456	0,135	1,237	0,466	0,131	1,284	0,477	0,133	1,322	0,490	0,142	1,350	0,504
	0,8	0,130	1,305	0,365	0,118	1,349	0,364	0,114	1,385	0,368	0,118	1,413	0,377	0,129	1,433	0,389
	0,9	0,175	1,402	0,298	0,164	1,436	0,291	0,161	1,463	0,291	0,165	1,485	0,297	0,177	1,502	0,309
200	0,1	0,891	0,496	0,536	0,886	0,655	0,678	0,882	0,838	0,843	0,880	1,041	1,025	0,880	1,260	1,222
	0,2	0,776	0,549	0,594	0,771	0,696	0,711	0,767	0,858	0,840	0,766	1,031	0,978	0,769	1,213	1,124
	0,3	0,633	0,640	0,638	0,627	0,771	0,728	0,624	0,906	0,821	0,624	1,044	0,918	0,628	1,185	1,018
	0,4	0,479	0,761	0,649	0,473	0,871	0,712	0,469	0,979	0,775	0,470	1,084	0,838	0,474	1,185	0,901
	0,5	0,331	0,901	0,616	0,324	0,990	0,657	0,320	1,073	0,697	0,321	1,148	0,734	0,326	1,215	0,770
	0,6	0,204	1,049	0,542	0,196	1,119	0,565	0,192	1,180	0,587	0,193	1,231	0,608	0,199	1,272	0,628
	0,7	0,114	1,193	0,438	0,106	1,246	0,448	0,102	1,290	0,459	0,104	1,324	0,470	0,111	1,348	0,482
	0,8	0,079	1,321	0,327	0,070	1,360	0,328	0,067	1,391	0,332	0,069	1,414	0,338	0,077	1,430	0,348
	0,9	0,111	1,420	0,242	0,102	1,448	0,237	0,100	1,471	0,237	0,103	1,488	0,241	0,112	1,501	0,251
300	0,1	0,990	0,485	0,535	0,987	0,660	0,693	0,985	0,860	0,873	0,984	1,080	1,070	0,984	1,318	1,284
	0,2	0,861	0,544	0,608	0,858	0,703	0,734	0,856	0,877	0,873	0,856	1,062	1,021	0,858	1,259	1,179
	0,3	0,700	0,642	0,660	0,697	0,779	0,754	0,695	0,922	0,854	0,695	1,068	0,956	0,698	1,221	1,064
	0,4	0,526	0,768	0,671	0,522	0,881	0,737	0,520	0,993	0,804	0,521	1,102	0,870	0,524	1,211	0,936

	0,5	0,355	0,913	0,634	0,351	1,002	0,676	0,349	1,085	0,717	0,349	1,161	0,755	0,353	1,232	0,792
	0,6	0,205	1,064	0,549	0,199	1,132	0,572	0,197	1,191	0,595	0,198	1,241	0,615	0,202	1,281	0,634
	0,7	0,091	1,212	0,427	0,085	1,261	0,438	0,083	1,301	0,448	0,084	1,332	0,458	0,089	1,353	0,468
	0,8	0,032	1,343	0,294	0,026	1,376	0,296	0,024	1,402	0,299	0,025	1,421	0,304	0,031	1,431	0,311
	0,9	0,047	1,441	0,186	0,041	1,463	0,183	0,039	1,480	0,183	0,041	1,492	0,186	0,047	1,499	0,193



Parâmetros Geométricos  $H_2/H_1$  e  $H_3/H_1$ Tabela 21 – Coeficientes de perda de carga para os parâmetros geométricos  $H_2/H_1$  e  $H_3/H_1$  em função do número de Reynolds e da fração de caudal  $\beta$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$H_2/H_1 = 0,75$			$H_3/H_1 = 0,50$			$H_3/H_1 = 0,75$		
		$K_{12}$	$K_{13}$	$K$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K$
1	0,1	19,820	28,445	27,582	11,006	77,682	71,014	15,702	43,033	40,300
	0,2	23,976	27,128	26,498	12,080	70,290	58,648	17,190	39,948	35,397
	0,3	28,142	25,819	26,516	13,166	62,912	47,988	18,688	36,873	31,417
	0,4	32,315	24,519	27,638	14,263	55,547	39,033	20,196	33,808	28,363
	0,5	36,499	23,227	29,863	15,373	48,194	31,783	21,714	30,753	26,233
	0,6	40,690	21,943	33,191	16,494	40,853	26,237	23,241	27,707	25,027
	0,7	44,890	20,667	37,623	17,627	33,524	22,396	24,778	24,670	24,746
	0,8	49,099	19,399	43,159	18,773	26,206	20,259	26,325	21,643	25,388
	0,9	53,317	18,138	49,799	19,930	18,901	19,827	27,880	18,625	26,955
2	0,1	9,711	14,266	13,810	5,213	38,925	35,554	7,613	21,571	20,175
	0,2	11,794	13,633	13,265	5,758	35,256	29,356	8,363	20,057	17,719
	0,3	13,885	13,008	13,271	6,316	31,604	24,018	9,124	18,554	15,725
	0,4	15,986	12,392	13,830	6,884	27,966	19,533	9,895	17,061	14,195
	0,5	18,097	11,783	14,940	7,465	24,341	15,903	10,676	15,577	13,126
	0,6	20,217	11,183	16,603	8,058	20,728	13,126	11,466	14,103	12,521
	0,7	22,345	10,589	18,818	8,663	17,128	11,203	12,267	12,638	12,378
	0,8	24,483	10,002	21,587	9,280	13,539	10,132	13,076	11,181	12,697
	0,9	26,630	9,421	24,909	9,909	9,962	9,914	13,896	9,733	13,479
3	0,1	6,346	9,548	9,228	3,286	26,026	23,752	4,919	14,431	13,479
	0,2	7,736	9,142	8,861	3,654	23,597	19,608	5,423	13,439	11,836
	0,3	9,136	8,745	8,862	4,034	21,182	16,038	5,938	12,458	10,502

	0,4	10,546	8,356	9,232	4,426	18,784	13,041	6,462	11,488	9,478
	0,5	11,965	7,975	9,970	4,830	16,400	10,615	6,997	10,527	8,762
	0,6	13,394	7,601	11,077	5,247	14,029	8,760	7,541	9,576	8,355
	0,7	14,833	7,233	12,553	5,675	11,670	7,474	8,096	8,634	8,257
	0,8	16,281	6,872	14,399	6,116	9,322	6,757	8,660	7,700	8,468
	0,9	17,738	6,516	16,616	6,569	6,985	6,610	9,234	6,773	8,988
4	0,1	4,668	7,196	6,943	2,328	19,591	17,865	3,575	10,869	10,140
	0,2	5,711	6,903	6,665	2,606	17,778	14,743	3,955	10,138	8,901
	0,3	6,764	6,619	6,662	2,896	15,982	12,056	4,346	9,417	7,896
	0,4	7,827	6,343	6,937	3,198	14,201	9,800	4,747	8,708	7,123
	0,5	8,901	6,075	7,488	3,514	12,436	7,975	5,158	8,008	6,583
	0,6	9,985	5,813	8,316	3,841	10,684	6,578	5,580	7,318	6,275
	0,7	11,078	5,558	9,422	4,181	8,945	5,611	6,011	6,637	6,199
	0,8	12,182	5,308	10,807	4,534	7,217	5,071	6,453	5,963	6,355
	0,9	13,295	5,063	12,472	4,899	5,499	4,959	6,904	5,297	6,743
5	0,1	3,665	5,790	5,577	1,757	15,743	14,344	2,772	8,739	8,142
	0,2	4,498	5,564	5,351	1,980	14,297	11,833	3,077	8,163	7,146
	0,3	5,343	5,347	5,346	2,216	12,869	9,673	3,393	7,598	6,337
	0,4	6,198	5,139	5,563	2,464	11,458	7,860	3,719	7,045	5,715
	0,5	7,064	4,938	6,001	2,725	10,063	6,394	4,056	6,502	5,279
	0,6	7,941	4,744	6,662	2,999	8,682	5,272	4,403	5,968	5,029
	0,7	8,827	4,556	7,546	3,285	7,314	4,494	4,760	5,442	4,965
	0,8	9,724	4,372	8,654	3,585	5,957	4,060	5,128	4,925	5,088
	0,9	10,631	4,193	9,987	3,897	4,610	3,968	5,506	4,414	5,397
10	0,1	1,698	3,010	2,879	0,669	8,119	7,374	1,205	4,523	4,191
	0,2	2,105	2,915	2,753	0,771	7,392	6,068	1,351	4,251	3,671

	0,3	2,524	2,830	2,739	0,886	6,689	4,948	1,508	3,994	3,248
	0,4	2,956	2,756	2,836	1,015	6,008	4,011	1,677	3,750	2,921
	0,5	3,402	2,689	3,046	1,160	5,347	3,254	1,859	3,518	2,688
	0,6	3,861	2,629	3,368	1,320	4,704	2,674	2,053	3,296	2,550
	0,7	4,333	2,574	3,805	1,496	4,075	2,270	2,260	3,082	2,507
	0,8	4,818	2,522	4,359	1,687	3,458	2,041	2,480	2,875	2,559
	0,9	5,316	2,471	5,032	1,893	2,848	1,989	2,712	2,672	2,708
20	0,1	0,833	1,680	1,595	0,286	4,421	4,008	0,552	2,487	2,294
	0,2	1,005	1,640	1,513	0,299	4,027	3,282	0,594	2,356	2,003
	0,3	1,190	1,617	1,489	0,325	3,666	2,664	0,647	2,244	1,765
	0,4	1,390	1,608	1,521	0,366	3,336	2,148	0,713	2,151	1,576
	0,5	1,608	1,611	1,610	0,426	3,034	1,730	0,796	2,075	1,436
	0,6	1,845	1,623	1,756	0,508	2,755	1,407	0,898	2,012	1,343
	0,7	2,101	1,640	1,962	0,613	2,495	1,178	1,018	1,958	1,300
	0,8	2,376	1,659	2,233	0,742	2,247	1,043	1,157	1,908	1,307
	0,9	2,670	1,675	2,570	0,891	2,002	1,002	1,314	1,858	1,369
40	0,1	0,590	1,074	1,026	0,323	2,653	2,420	0,440	1,530	1,421
	0,2	0,622	1,054	0,968	0,272	2,406	1,979	0,406	1,458	1,248
	0,3	0,661	1,058	0,939	0,221	2,199	1,606	0,375	1,414	1,102
	0,4	0,712	1,084	0,936	0,181	2,034	1,293	0,353	1,397	0,979
	0,5	0,782	1,131	0,957	0,159	1,907	1,033	0,348	1,404	0,876
	0,6	0,877	1,192	1,003	0,164	1,814	0,824	0,368	1,429	0,793
	0,7	1,001	1,260	1,079	0,202	1,744	0,665	0,418	1,466	0,733
	0,8	1,156	1,326	1,190	0,278	1,686	0,560	0,500	1,503	0,701
	0,9	1,342	1,382	1,346	0,390	1,626	0,514	0,614	1,531	0,705
60	0,1	0,607	0,900	0,870	0,438	2,080	1,916	0,509	1,231	1,158

	0,2	0,585	0,885	0,825	0,362	1,879	1,575	0,445	1,178	1,031
	0,3	0,561	0,897	0,797	0,277	1,722	1,289	0,374	1,157	0,922
	0,4	0,545	0,939	0,781	0,195	1,611	1,045	0,307	1,168	0,823
	0,5	0,548	1,005	0,776	0,129	1,543	0,836	0,255	1,207	0,731
	0,6	0,578	1,089	0,782	0,090	1,513	0,659	0,228	1,267	0,644
	0,7	0,643	1,180	0,804	0,088	1,512	0,515	0,237	1,339	0,568
	0,8	0,747	1,267	0,851	0,132	1,523	0,410	0,287	1,410	0,511
	0,9	0,892	1,337	0,936	0,224	1,526	0,354	0,379	1,464	0,487
80	0,1	0,655	0,827	0,810	0,537	1,795	1,670	0,587	1,089	1,039
	0,2	0,603	0,814	0,772	0,447	1,618	1,384	0,506	1,047	0,939
	0,3	0,543	0,832	0,745	0,341	1,488	1,144	0,411	1,040	0,851
	0,4	0,486	0,880	0,723	0,234	1,405	0,937	0,316	1,067	0,766
	0,5	0,447	0,956	0,702	0,140	1,367	0,754	0,234	1,123	0,678
	0,6	0,438	1,052	0,684	0,072	1,370	0,591	0,177	1,202	0,587
	0,7	0,467	1,157	0,674	0,043	1,404	0,451	0,157	1,293	0,498
	0,8	0,541	1,256	0,684	0,064	1,452	0,342	0,184	1,381	0,423
	0,9	0,663	1,334	0,730	0,141	1,489	0,276	0,261	1,449	0,380
100	0,1	0,705	0,794	0,785	0,618	1,625	1,525	0,655	1,010	0,975
	0,2	0,633	0,782	0,752	0,517	1,464	1,275	0,563	0,976	0,893
	0,3	0,546	0,801	0,725	0,398	1,351	1,065	0,452	0,978	0,820
	0,4	0,461	0,853	0,696	0,274	1,285	0,880	0,338	1,014	0,744
	0,5	0,394	0,934	0,664	0,160	1,266	0,713	0,235	1,082	0,658
	0,6	0,358	1,037	0,629	0,072	1,289	0,559	0,156	1,172	0,562
	0,7	0,363	1,149	0,599	0,023	1,345	0,420	0,115	1,274	0,463
	0,8	0,417	1,256	0,585	0,027	1,416	0,305	0,124	1,373	0,374
	0,9	0,523	1,340	0,605	0,092	1,473	0,230	0,190	1,448	0,316

150	0,1	0,809	0,773	0,776	0,760	1,403	1,338	0,782	0,922	0,908
	0,2	0,704	0,760	0,749	0,645	1,265	1,141	0,673	0,900	0,855
	0,3	0,576	0,777	0,717	0,503	1,177	0,975	0,538	0,916	0,803
	0,4	0,447	0,829	0,676	0,353	1,137	0,823	0,395	0,966	0,738
	0,5	0,335	0,913	0,624	0,210	1,144	0,677	0,259	1,046	0,652
	0,6	0,258	1,022	0,564	0,090	1,193	0,531	0,146	1,149	0,547
	0,7	0,226	1,143	0,501	0,009	1,277	0,390	0,071	1,264	0,429
	0,8	0,251	1,261	0,453	-0,016	1,379	0,263	0,050	1,374	0,315
	0,9	0,335	1,355	0,437	0,028	1,464	0,172	0,096	1,459	0,233
200	0,1	0,883	0,780	0,790	0,853	1,300	1,255	0,869	0,896	0,893
	0,2	0,759	0,762	0,761	0,728	1,176	1,086	0,749	0,881	0,855
	0,3	0,606	0,775	0,724	0,575	1,102	0,944	0,600	0,903	0,812
	0,4	0,449	0,823	0,674	0,409	1,076	0,809	0,440	0,957	0,750
	0,5	0,312	0,906	0,609	0,249	1,096	0,672	0,285	1,041	0,663
	0,6	0,212	1,016	0,533	0,110	1,157	0,529	0,152	1,148	0,550
	0,7	0,160	1,141	0,454	0,011	1,253	0,383	0,057	1,266	0,420
	0,8	0,167	1,264	0,386	-0,033	1,368	0,247	0,018	1,380	0,290
	0,9	0,239	1,365	0,352	-0,003	1,467	0,144	0,050	1,469	0,192
300	0,1	0,979	0,803	0,821	0,967	1,223	1,198	0,977	0,898	0,905
	0,2	0,831	0,776	0,787	0,832	1,115	1,058	0,845	0,886	0,878
	0,3	0,648	0,781	0,741	0,664	1,055	0,938	0,680	0,910	0,841
	0,4	0,462	0,822	0,678	0,481	1,041	0,817	0,501	0,966	0,780
	0,5	0,296	0,901	0,599	0,302	1,070	0,686	0,326	1,050	0,688
	0,6	0,169	1,011	0,506	0,143	1,139	0,542	0,171	1,156	0,565
	0,7	0,095	1,139	0,408	0,022	1,242	0,388	0,053	1,275	0,419
	0,8	0,084	1,268	0,320	-0,043	1,366	0,238	-0,009	1,391	0,271

	0,9	0,142	1,374	0,265	-0,032	1,476	0,119	0,004	1,481	0,152
--	-----	-------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	-------

Parâmetro Geométrico  $E/H_1$

Tabela 22 – Coeficientes de perda de carga para o parâmetro geométrico  $E/H_1$  (e para  $z/E = 0,50$ ) em função do número de Reynolds

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$E/H_1 = 0,25$			$E/H_1 = 0,50$			$E/H_1 = 0,75$			$E/H_1 = 1$			$E/H_1 = 2$		
		$K_{12}$	$K_{13}$	$K$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K$
1	0,1	83,890	101,575	99,807	42,873	55,476	54,216	30,387	41,656	40,529	25,039	35,947	34,856	19,411	30,481	29,374
	0,2	91,549	98,812	97,359	46,814	53,722	52,341	33,203	40,198	38,799	27,375	34,594	33,150	21,238	29,169	27,583
	0,3	99,210	96,054	97,001	50,765	51,979	51,615	36,028	38,750	37,933	29,720	33,251	32,191	23,076	27,867	26,429
	0,4	106,874	93,300	98,730	54,722	50,242	52,034	38,862	37,308	37,930	32,075	31,917	31,980	24,923	26,574	25,914
	0,5	114,546	90,552	102,549	58,685	48,511	53,598	41,706	35,878	38,792	34,439	30,592	32,516	26,780	25,291	26,036
	0,6	122,221	87,805	108,454	62,656	46,787	56,309	44,557	34,453	40,516	36,812	29,276	33,798	28,648	24,017	26,795
	0,7	129,899	85,065	116,449	66,635	45,069	60,165	47,418	33,036	43,104	39,196	27,968	35,828	30,525	22,752	28,193
	0,8	137,584	82,327	126,533	70,621	43,357	65,168	50,288	31,627	46,556	41,590	26,667	38,605	32,413	21,495	30,230
	0,9	145,275	79,593	138,707	74,614	41,650	71,317	53,167	30,225	50,873	43,994	25,375	42,132	34,312	20,246	32,905
2	0,1	41,852	50,845	49,945	21,276	27,820	27,166	14,996	20,932	20,338	12,302	18,089	17,510	9,474	15,350	14,762
	0,2	45,683	49,473	48,715	23,252	26,963	26,221	16,409	20,227	19,463	13,475	17,438	16,645	10,393	14,721	13,856
	0,3	49,519	48,107	48,531	25,236	26,114	25,850	17,832	19,531	19,021	14,658	16,798	16,156	11,323	14,103	13,269
	0,4	53,359	46,746	49,391	27,226	25,272	26,053	19,263	18,843	19,011	15,851	16,166	16,040	12,263	13,495	13,002
	0,5	57,203	45,388	51,296	29,224	24,436	26,830	20,704	18,163	19,434	17,054	15,544	16,299	13,214	12,896	13,055
	0,6	61,053	44,036	54,246	31,229	23,606	28,180	22,153	17,491	20,289	18,267	14,930	16,932	14,175	12,305	13,427
	0,7	64,907	42,686	58,241	33,243	22,783	30,105	23,612	16,826	21,576	19,490	14,323	17,940	15,146	11,723	14,119
	0,8	68,768	41,342	63,283	35,263	21,964	32,603	25,081	16,167	23,298	20,724	13,723	19,324	16,129	11,148	15,132
	0,9	72,633	39,999	69,369	37,292	21,150	35,678	26,560	15,513	25,455	21,969	13,130	21,085	17,122	10,579	16,468
3	0,1	27,844	33,950	33,340	14,084	18,626	18,172	9,875	14,055	13,637	8,066	12,170	11,760	6,169	10,336	9,920

	0,2	30,399	33,042	32,513	15,404	18,066	17,533	10,819	13,599	13,043	8,850	11,751	11,171	6,785	9,935	9,305
	0,3	32,959	32,139	32,385	16,731	17,514	17,279	11,772	13,152	12,738	9,644	11,344	10,834	7,411	9,543	8,904
	0,4	35,524	31,241	32,954	18,065	16,969	17,407	12,735	12,715	12,723	10,448	10,946	10,747	8,047	9,162	8,716
	0,5	38,093	30,347	34,220	19,407	16,431	17,919	13,707	12,285	12,996	11,263	10,557	10,910	8,695	8,790	8,742
	0,6	40,668	29,458	36,184	20,757	15,899	18,814	14,689	11,863	13,559	12,088	10,175	11,323	9,353	8,425	8,982
	0,7	43,247	28,571	38,845	22,116	15,372	20,093	15,681	11,447	14,411	12,925	9,801	11,988	10,022	8,069	9,436
	0,8	45,833	27,688	42,204	23,482	14,849	21,756	16,684	11,036	15,555	13,773	9,432	12,904	10,703	7,718	10,106
	0,9	48,424	26,808	46,262	24,857	14,331	23,805	17,697	10,630	16,990	14,632	9,068	14,075	11,395	7,374	10,993
4	0,1	20,843	25,514	25,047	10,494	14,045	13,690	7,323	10,638	10,306	5,958	9,234	8,907	4,525	7,852	7,519
	0,2	22,760	24,837	24,421	11,484	13,633	13,203	8,031	10,305	9,850	6,545	8,931	8,454	4,987	7,562	7,047
	0,3	24,683	24,165	24,320	12,482	13,229	13,005	8,748	9,983	9,612	7,143	8,639	8,190	5,459	7,284	6,736
	0,4	26,609	23,498	24,742	13,488	12,833	13,095	9,474	9,670	9,592	7,751	8,357	8,114	5,943	7,015	6,586
	0,5	28,540	22,835	25,688	14,502	12,443	13,472	10,212	9,365	9,788	8,370	8,084	8,227	6,438	6,755	6,596
	0,6	30,478	22,177	27,157	15,524	12,060	14,138	10,959	9,067	10,202	9,001	7,818	8,528	6,944	6,504	6,768
	0,7	32,420	21,521	29,151	16,555	11,681	15,093	11,718	8,775	10,835	9,644	7,559	9,019	7,462	6,259	7,101
	0,8	34,369	20,869	31,669	17,595	11,306	16,337	12,488	8,488	11,688	10,299	7,305	9,700	7,992	6,020	7,598
	0,9	36,323	20,219	34,713	18,644	10,934	17,873	13,268	8,204	12,762	10,966	7,055	10,575	8,534	5,785	8,259
5	0,1	16,646	20,461	20,080	8,346	11,310	11,013	5,801	8,604	8,323	4,703	7,491	7,212	3,547	6,377	6,094
	0,2	18,180	19,921	19,573	9,138	10,985	10,616	6,365	8,344	7,948	5,170	7,256	6,839	3,914	6,154	5,706
	0,3	19,719	19,388	19,487	9,937	10,670	10,450	6,938	8,096	7,749	5,648	7,032	6,617	4,293	5,943	5,448
	0,4	21,262	18,859	19,820	10,744	10,362	10,515	7,522	7,857	7,723	6,137	6,820	6,547	4,683	5,742	5,318
	0,5	22,811	18,335	20,573	11,560	10,062	10,811	8,117	7,627	7,872	6,638	6,616	6,627	5,085	5,549	5,317
	0,6	24,366	17,814	21,745	12,386	9,767	11,338	8,723	7,404	8,196	7,151	6,420	6,859	5,500	5,365	5,446
	0,7	25,926	17,297	23,337	13,220	9,477	12,097	9,341	7,187	8,695	7,677	6,230	7,243	5,927	5,187	5,705
	0,8	27,493	16,783	25,351	14,064	9,191	13,090	9,971	6,974	9,372	8,216	6,045	7,782	6,366	5,014	6,096
	0,9	29,066	16,271	27,786	14,918	8,907	14,317	10,613	6,763	10,228	8,768	5,862	8,478	6,819	4,844	6,621

10	0,1	8,271	10,411	10,197	4,102	5,918	5,736	2,832	4,635	4,455	2,275	4,116	3,932	1,662	3,533	3,346
	0,2	9,037	10,143	9,922	4,487	5,766	5,510	3,095	4,519	4,234	2,487	4,013	3,708	1,827	3,439	3,117
	0,3	9,808	9,883	9,861	4,880	5,626	5,402	3,368	4,417	4,102	2,710	3,925	3,561	2,003	3,358	2,952
	0,4	10,584	9,629	10,011	5,283	5,496	5,411	3,652	4,327	4,057	2,945	3,851	3,488	2,194	3,289	2,851
	0,5	11,366	9,380	10,373	5,696	5,375	5,536	3,951	4,248	4,100	3,196	3,787	3,491	2,400	3,230	2,815
	0,6	12,155	9,135	10,947	6,122	5,262	5,778	4,264	4,177	4,230	3,463	3,730	3,570	2,622	3,179	2,845
	0,7	12,951	8,894	11,734	6,560	5,152	6,137	4,595	4,111	4,450	3,749	3,679	3,728	2,861	3,133	2,943
	0,8	13,755	8,654	12,735	7,011	5,045	6,618	4,943	4,047	4,763	4,053	3,630	3,968	3,117	3,090	3,112
	0,9	14,567	8,415	13,952	7,476	4,937	7,222	5,308	3,981	5,175	4,376	3,579	4,296	3,391	3,047	3,357
20	0,1	4,127	5,488	5,352	2,101	3,370	3,244	1,509	2,841	2,707	1,235	2,640	2,500	0,882	2,299	2,157
	0,2	4,505	5,353	5,184	2,265	3,301	3,094	1,597	2,792	2,553	1,291	2,598	2,337	0,916	2,259	1,990
	0,3	4,886	5,228	5,125	2,435	3,248	3,004	1,690	2,761	2,440	1,354	2,573	2,208	0,960	2,236	1,853
	0,4	5,274	5,110	5,176	2,613	3,210	2,971	1,795	2,747	2,366	1,430	2,564	2,111	1,020	2,228	1,745
	0,5	5,668	5,000	5,334	2,805	3,185	2,995	1,917	2,745	2,331	1,525	2,567	2,046	1,100	2,232	1,666
	0,6	6,071	4,895	5,601	3,012	3,170	3,075	2,060	2,752	2,337	1,644	2,578	2,018	1,204	2,246	1,621
	0,7	6,484	4,794	5,977	3,239	3,159	3,215	2,228	2,763	2,389	1,790	2,594	2,031	1,333	2,265	1,613
	0,8	6,906	4,696	6,464	3,486	3,148	3,418	2,423	2,773	2,493	1,965	2,609	2,094	1,489	2,285	1,648
	0,9	7,340	4,598	7,066	3,755	3,130	3,693	2,647	2,774	2,660	2,171	2,616	2,215	1,672	2,299	1,735
40	0,1	2,118	3,164	3,059	1,263	2,311	2,206	1,034	2,221	2,102	0,902	2,199	2,069	0,666	1,918	1,792
	0,2	2,291	3,093	2,932	1,288	2,281	2,082	1,001	2,193	1,955	0,846	2,163	1,900	0,604	1,880	1,625
	0,3	2,468	3,035	2,865	1,312	2,269	1,982	0,967	2,183	1,818	0,793	2,145	1,739	0,549	1,863	1,469
	0,4	2,652	2,989	2,854	1,347	2,274	1,903	0,947	2,188	1,691	0,754	2,144	1,588	0,511	1,868	1,325
	0,5	2,845	2,954	2,899	1,399	2,293	1,846	0,948	2,207	1,577	0,739	2,158	1,449	0,497	1,891	1,194
	0,6	3,047	2,929	3,000	1,474	2,324	1,814	0,978	2,237	1,481	0,755	2,185	1,327	0,515	1,928	1,080
	0,7	3,261	2,912	3,156	1,575	2,362	1,811	1,043	2,273	1,412	0,809	2,219	1,232	0,569	1,973	0,990
	0,8	3,487	2,899	3,369	1,707	2,397	1,845	1,147	2,308	1,380	0,906	2,254	1,175	0,662	2,019	0,933



	0,9	3,728	2,882	3,643	1,872	2,418	1,927	1,295	2,333	1,399	1,048	2,279	1,171	0,796	2,055	0,922
60	0,1	1,494	2,474	2,376	1,073	2,114	2,010	0,959	2,194	2,071	0,866	2,224	2,088	0,659	1,932	1,804
	0,2	1,586	2,424	2,256	1,029	2,089	1,877	0,865	2,151	1,894	0,757	2,163	1,882	0,556	1,871	1,608
	0,3	1,683	2,389	2,177	0,983	2,078	1,749	0,773	2,123	1,718	0,653	2,121	1,681	0,459	1,836	1,423
	0,4	1,790	2,367	2,137	0,952	2,082	1,630	0,695	2,112	1,545	0,564	2,100	1,485	0,377	1,827	1,247
	0,5	1,908	2,360	2,134	0,944	2,102	1,523	0,643	2,118	1,380	0,499	2,099	1,299	0,320	1,842	1,081
	0,6	2,039	2,366	2,169	0,964	2,134	1,432	0,624	2,139	1,230	0,469	2,115	1,127	0,296	1,876	0,928
	0,7	2,181	2,383	2,241	1,015	2,175	1,363	0,645	2,170	1,103	0,482	2,145	0,981	0,314	1,923	0,797
	0,8	2,336	2,404	2,350	1,102	2,216	1,325	0,713	2,205	1,012	0,545	2,179	0,872	0,379	1,973	0,698
	0,9	2,509	2,415	2,499	1,230	2,245	1,331	0,832	2,232	0,972	0,663	2,207	0,817	0,495	2,013	0,647
80	0,1	1,213	2,181	2,084	1,017	2,114	2,004	0,948	2,269	2,137	0,869	2,319	2,174	0,681	2,015	1,881
	0,2	1,253	2,140	1,963	0,928	2,078	1,848	0,820	2,202	1,925	0,735	2,230	1,931	0,554	1,929	1,654
	0,3	1,301	2,113	1,870	0,838	2,054	1,689	0,695	2,151	1,714	0,604	2,162	1,695	0,434	1,872	1,440
	0,4	1,363	2,102	1,807	0,766	2,044	1,533	0,585	2,119	1,506	0,487	2,118	1,466	0,328	1,844	1,237
	0,5	1,439	2,107	1,773	0,722	2,051	1,386	0,501	2,108	1,304	0,393	2,099	1,246	0,244	1,844	1,044
	0,6	1,530	2,127	1,769	0,709	2,073	1,255	0,452	2,115	1,117	0,333	2,101	1,040	0,195	1,870	0,865
	0,7	1,633	2,159	1,791	0,732	2,108	1,145	0,447	2,137	0,954	0,320	2,122	0,861	0,189	1,912	0,706
	0,8	1,751	2,195	1,840	0,794	2,146	1,065	0,493	2,167	0,828	0,363	2,153	0,721	0,237	1,961	0,582
	0,9	1,888	2,219	1,921	0,902	2,175	1,030	0,597	2,193	0,757	0,467	2,180	0,638	0,341	2,002	0,507
100	0,1	1,066	2,043	1,945	1,001	2,173	2,056	0,948	2,361	2,220	0,875	2,422	2,267	0,712	2,109	1,970
	0,2	1,067	2,005	1,817	0,881	2,121	1,873	0,803	2,271	1,978	0,730	2,309	1,993	0,565	2,003	1,715
	0,3	1,078	1,980	1,710	0,763	2,080	1,685	0,660	2,199	1,737	0,588	2,219	1,729	0,429	1,924	1,475
	0,4	1,109	1,972	1,627	0,663	2,053	1,497	0,530	2,148	1,500	0,454	2,154	1,474	0,308	1,876	1,249
	0,5	1,157	1,981	1,569	0,593	2,044	1,319	0,424	2,119	1,271	0,340	2,116	1,228	0,209	1,861	1,035
	0,6	1,221	2,006	1,535	0,558	2,054	1,156	0,354	2,112	1,057	0,260	2,104	0,997	0,141	1,876	0,835
	0,7	1,300	2,043	1,523	0,562	2,079	1,017	0,330	2,124	0,868	0,227	2,115	0,793	0,118	1,912	0,656

	0,8	1,395	2,085	1,533	0,608	2,111	0,909	0,361	2,149	0,718	0,253	2,141	0,631	0,152	1,958	0,513
	0,9	1,509	2,115	1,570	0,703	2,138	0,847	0,454	2,173	0,626	0,348	2,167	0,530	0,247	1,999	0,423
150	0,1	0,925	1,968	1,863	0,993	2,356	2,220	0,947	2,564	2,402	0,886	2,642	2,467	0,798	2,323	2,171
	0,2	0,854	1,924	1,710	0,843	2,264	1,980	0,792	2,434	2,105	0,732	2,493	2,141	0,616	2,179	1,867
	0,3	0,801	1,889	1,562	0,689	2,183	1,735	0,637	2,322	1,816	0,587	2,361	1,829	0,446	2,059	1,575
	0,4	0,777	1,871	1,433	0,549	2,118	1,491	0,485	2,233	1,534	0,443	2,254	1,530	0,305	1,969	1,303
	0,5	0,780	1,872	1,326	0,438	2,075	1,256	0,347	2,170	1,258	0,304	2,177	1,241	0,184	1,918	1,051
	0,6	0,805	1,891	1,239	0,365	2,055	1,041	0,241	2,133	0,997	0,186	2,132	0,965	0,089	1,906	0,815
	0,7	0,848	1,923	1,171	0,337	2,057	0,853	0,182	2,122	0,764	0,115	2,119	0,716	0,035	1,924	0,602
	0,8	0,910	1,962	1,120	0,357	2,075	0,701	0,185	2,132	0,574	0,112	2,131	0,515	0,042	1,961	0,426
	0,9	0,995	1,993	1,094	0,434	2,095	0,600	0,260	2,150	0,449	0,187	2,153	0,384	0,121	1,999	0,309

## Anexo C – Análise de Incerteza aos Comprimentos de Escoamento separado

### Caso Base e Parâmetro Geométrico $\theta$

#### Caso Base

$$\theta = 70^\circ$$

Tabela 23 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para o caso base

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{v_i}}/H_1$	$x_{r_{v_f}}/H_1$	$x_{r_{v_T}}/H_1$
60	0,1	16,78% <sup>(2)</sup>	4,93% <sup>(1)</sup>	10,98%
	0,2	46,61%	2,53%	8,25%
	0,3	99,77%	1,63%	7,44%
	0,4	176,10%	1,16%	6,79%
	0,5	244,16%	0,86%	5,86%
	0,6	192,83%	0,62%	4,46%
	0,7	146,92% <sup>(1)</sup>	0,41%	3,72%
	0,8	137,60% <sup>(1)</sup>	0,19%	2,71% <sup>(1)</sup>
	0,9	118,00% <sup>(1)</sup>	0,06% <sup>(2)</sup>	1,83% <sup>(1)</sup>
300	0,1	264,51%	0,40% <sup>(2)</sup>	1,16%
	0,2	226,53%	0,44% <sup>(2)</sup>	1,11%
	0,3	190,36%	0,47% <sup>(2)</sup>	1,05%
	0,4	155,85%	0,49% <sup>(2)</sup>	0,98%
	0,5	122,60%	0,47% <sup>(2)</sup>	0,70% <sup>(2)</sup>
	0,6	60,47% <sup>(1)</sup>	0,41% <sup>(2)</sup>	0,57% <sup>(2)</sup>
	0,7	16,20% <sup>(1)</sup>	0,30% <sup>(2)</sup>	0,37% <sup>(2)</sup>
	0,8	20,48% <sup>(2)</sup>	0,15% <sup>(2)</sup>	0,04% <sup>(2)</sup>
	0,9	72,64% <sup>(1)</sup>	0,07% <sup>(1)</sup>	0,66% <sup>(1)</sup>

Tabela 24 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para o caso base

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{h_i}}/H_1$	$x_{r_{h_f}}/H_1$	$x_{r_{h_T}}/H_1$
60	0,1	1,61% <sup>(2)</sup>	0,48% <sup>(2)</sup>	1,04% <sup>(2)</sup>
	0,1	0,40%	0,27%	0,01% <sup>(1)</sup>
	0,2	0,45%	0,33% <sup>(2)</sup>	0,09% <sup>(2)</sup>
300	0,3	0,53%	0,34% <sup>(2)</sup>	0,10% <sup>(2)</sup>
	0,4	0,67%	0,08% <sup>(1)</sup>	0,11% <sup>(2)</sup>
	0,5	1,04%	0,50% <sup>(2)</sup>	0,60% <sup>(2)</sup>
	0,6	2,71% <sup>(2)</sup>	1,72% <sup>(2)</sup>	2,02% <sup>(2)</sup>

Tabela 25 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para  $\theta = 70^\circ$

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{v_i}}/H_1$	$x_{r_{v_f}}/H_1$	$x_{r_{v_T}}/H_1$
60	0,4	21,04% <sup>(1)</sup>	2,65%	10,64%
	0,5	19,94%	1,43%	4,93%
	0,6	9,16% <sup>(2)</sup>	0,96%	1,92% <sup>(2)</sup>
	0,7	10,49% <sup>(2)</sup>	0,54% <sup>(2)</sup>	1,55% <sup>(2)</sup>
	0,8	12,43% <sup>(2)</sup>	0,37% <sup>(2)</sup>	1,34% <sup>(2)</sup>
	0,9	18,42% <sup>(2)</sup>	0,17%	1,24% <sup>(2)</sup>
	0,1	148,71%	0,88%	2,15%
	0,2	158,98%	0,88%	2,06%
	0,3	143,32%	0,63% <sup>(2)</sup>	1,83%
300	0,4	125,95%	0,64% <sup>(2)</sup>	1,66%
	0,5	112,37%	0,66% <sup>(2)</sup>	1,43%
	0,6	112,79%	0,57% <sup>(2)</sup>	1,37%
	0,7	113,41%	0,42% <sup>(2)</sup>	1,18%
	0,8	94,19% <sup>(1)</sup>	0,25% <sup>(2)</sup>	1,03%
	0,9	89,76% <sup>(1)</sup>	0,01% <sup>(1)</sup>	0,92%

Tabela 26 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para  $\theta = 70^\circ$

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{h_i}}/H_1$	$x_{r_{h_f}}/H_1$	$x_{r_{h_T}}/H_1$
60	0,1	1,62% <sup>(2)</sup>	0,67% <sup>(2)</sup>	1,10% <sup>(2)</sup>
	0,1	0,45%	0,18% <sup>(2)</sup>	0,03% <sup>(1)</sup>
	0,2	0,50%	0,28% <sup>(2)</sup>	0,09% <sup>(1)</sup>
300	0,3	0,59%	0,28% <sup>(2)</sup>	0,09% <sup>(1)</sup>
	0,4	0,75%	0,01% <sup>(1)</sup>	0,21%
	0,5	1,15%	0,53% <sup>(2)</sup>	0,64% <sup>(2)</sup>
	0,6	3,34% <sup>(2)</sup>	1,72% <sup>(2)</sup>	2,16% <sup>(2)</sup>

Análise de incerteza efetuada pelo método de extrapolação de *Richardson* e através de três malhas de refinamento consecutivo. A ordem de convergência verificada foi de primeira ordem, exceto nos casos:

- (1) Não se verificou convergência entre as três malhas, pelo que se considerou primeira ordem de convergência e utilizou-se as duas malhas mais refinadas para o cálculo da incerteza associada;
- (2) Ordem de convergência de segundo grau.

$\theta = 80^\circ$ Tabela 27 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para  $\theta = 80^\circ$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{v_i}}/H_1$	$x_{r_{v_f}}/H_1$	$x_{r_{v_T}}/H_1$
60	0,2	35,93% <sup>(1)</sup>	10,90% <sup>(1)</sup>	29,50% <sup>(2)</sup>
	0,3	18,67%	2,97%	7,81%
	0,4	14,09% <sup>(2)</sup>	1,66%	3,25% <sup>(2)</sup>
	0,5	20,80% <sup>(2)</sup>	1,10%	2,69% <sup>(2)</sup>
	0,6	71,29%	0,78%	4,20%
	0,7	108,98%	0,54%	4,14%
	0,8	147,04%	0,33%	3,87%
	0,9	126,53%	0,06% <sup>(1)</sup>	2,88%
	0,1	178,20%	0,55%	1,43%
300	0,2	177,61%	0,50% <sup>(2)</sup>	1,38%
	0,3	176,78%	0,53% <sup>(2)</sup>	1,32%
	0,4	177,78%	0,55% <sup>(2)</sup>	1,26%
	0,5	172,52%	0,53% <sup>(2)</sup>	0,95% <sup>(2)</sup>
	0,6	156,38%	0,46% <sup>(2)</sup>	0,84% <sup>(2)</sup>
	0,7	102,58% <sup>(1)</sup>	0,34% <sup>(2)</sup>	0,69% <sup>(2)</sup>
	0,8	75,88% <sup>(1)</sup>	0,18% <sup>(2)</sup>	0,66%
	0,9	47,53% <sup>(1)</sup>	0,02% <sup>(1)</sup>	0,34% <sup>(1)</sup>

Tabela 28 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para  $\theta = 80^\circ$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{h_i}}/H_1$	$x_{r_{h_f}}/H_1$	$x_{r_{h_T}}/H_1$
60	0,1	1,65% <sup>(2)</sup>	0,57% <sup>(2)</sup>	1,07% <sup>(2)</sup>
300	0,1	0,43%	0,18% <sup>(2)</sup>	0,03% <sup>(1)</sup>
	0,2	0,48%	0,29% <sup>(2)</sup>	0,11% <sup>(1)</sup>
	0,3	0,57%	0,29% <sup>(2)</sup>	0,07% <sup>(2)</sup>
	0,4	0,73%	0,03% <sup>(1)</sup>	0,18%
	0,5	1,12%	0,52% <sup>(2)</sup>	0,63% <sup>(2)</sup>
	0,6	3,08% <sup>(2)</sup>	1,70% <sup>(2)</sup>	2,09% <sup>(2)</sup>

 $\theta = 100^\circ$ Tabela 29 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para  $\theta = 100^\circ$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{v_i}}/H_1$	$x_{r_{v_f}}/H_1$	$x_{r_{v_T}}/H_1$
60	0,1	236,84%	1,26% <sup>(1)</sup>	9,79%
	0,2	331,31%	1,01% <sup>(1)</sup>	8,24%
	0,3	290,53%	0,84% <sup>(1)</sup>	6,44%
	0,4	237,58%	0,74%	4,98%
	0,5	252,76%	0,57%	4,16%
	0,6	168,84% <sup>(1)</sup>	0,41%	3,01% <sup>(1)</sup>
	0,7	109,46% <sup>(1)</sup>	0,24%	1,96% <sup>(1)</sup>
	0,8	50,28% <sup>(1)</sup>	0,02% <sup>(1)</sup>	0,82% <sup>(1)</sup>

300	0,9	2,16% <sup>(1)</sup>	0,19% <sup>(2)</sup>	0,33% <sup>(1)</sup>
	0,1	169,48%	0,29% <sup>(2)</sup>	0,57% <sup>(2)</sup>
	0,2	77,62% <sup>(2)</sup>	0,31% <sup>(2)</sup>	0,52% <sup>(2)</sup>
	0,3	49,11% <sup>(2)</sup>	0,33% <sup>(2)</sup>	0,46% <sup>(2)</sup>
	0,4	23,39% <sup>(1)</sup>	0,35% <sup>(2)</sup>	0,38% <sup>(2)</sup>
	0,5	40,29%	0,34% <sup>(2)</sup>	0,26% <sup>(2)</sup>
	0,6	96,34% <sup>(1)</sup>	0,31% <sup>(2)</sup>	0,10% <sup>(1)</sup>

Tabela 30 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para  $\theta = 100^\circ$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{h_i}}/H_1$	$x_{r_{h_f}}/H_1$	$x_{r_{h_T}}/H_1$
60	0,1	1,42% <sup>(2)</sup>	0,66% <sup>(1)</sup>	0,98% <sup>(2)</sup>
300	0,1	0,40%	0,42%	0,03% <sup>(2)</sup>
	0,2	0,45%	0,43% <sup>(2)</sup>	0,14% <sup>(2)</sup>
	0,3	0,53%	0,42% <sup>(2)</sup>	0,14% <sup>(2)</sup>
	0,4	0,67%	0,18%	0,11%
	0,5	1,01%	0,48% <sup>(2)</sup>	0,58% <sup>(2)</sup>
	0,6	2,32% <sup>(2)</sup>	1,76% <sup>(2)</sup>	1,96% <sup>(2)</sup>

 $\theta = 110^\circ$ Tabela 31 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para  $\theta = 110^\circ$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{v_i}}/H_1$	$x_{r_{v_f}}/H_1$	$x_{r_{v_T}}/H_1$
60	0,1	212,24% <sup>(1)</sup>	414,47% <sup>(1)</sup>	307,45% <sup>(1)</sup>
	0,2	209,37% <sup>(1)</sup>	981,07% <sup>(1)</sup>	526,82% <sup>(1)</sup>
	0,3	207,70% <sup>(1)</sup>	1965,07% <sup>(1)</sup>	2184,55% <sup>(1)</sup>
	0,4	206,99% <sup>(1)</sup>	479,29% <sup>(1)</sup>	1034,93% <sup>(1)</sup>
	0,5	206,58% <sup>(1)</sup>	290,95% <sup>(1)</sup>	456,40% <sup>(1)</sup>
	0,6	206,79% <sup>(1)</sup>	237,74% <sup>(1)</sup>	343,51% <sup>(1)</sup>
	0,7	211,79% <sup>(1)</sup>	232,09% <sup>(1)</sup>	333,40% <sup>(1)</sup>
300	0,1	203,43% <sup>(1)</sup>	76,23% <sup>(1)</sup>	75,98% <sup>(1)</sup>
	0,2	205,76% <sup>(1)</sup>	77,35% <sup>(1)</sup>	77,11% <sup>(1)</sup>
	0,3	100,00% <sup>(1)</sup>	77,93% <sup>(1)</sup>	77,71% <sup>(1)</sup>

Tabela 32 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para  $\theta = 110^\circ$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{h_i}}/H_1$	$x_{r_{h_f}}/H_1$	$x_{r_{h_T}}/H_1$
60	0,1	165,29% <sup>(1)</sup>	312,17% <sup>(1)</sup>	1584,07% <sup>(1)</sup>
300	0,1	137,56% <sup>(1)</sup>	0,94%	62,55% <sup>(1)</sup>
	0,2	139,08% <sup>(1)</sup>	39,39% <sup>(1)</sup>	68,82% <sup>(1)</sup>
	0,3	141,24% <sup>(1)</sup>	48,51% <sup>(1)</sup>	70,28% <sup>(1)</sup>
	0,4	144,55% <sup>(1)</sup>	43,08% <sup>(1)</sup>	66,67% <sup>(1)</sup>
	0,5	150,33% <sup>(1)</sup>	10,97% <sup>(1)</sup>	52,60% <sup>(1)</sup>
	0,6	164,50% <sup>(1)</sup>	358,65% <sup>(1)</sup>	30,10% <sup>(1)</sup>

Parâmetros Geométricos  $H_2/H_1$  e  $H_3/H_1$ 

$$H_2/H_1 = 0,75$$

Tabela 33 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para  $H_2/H_1 = 0,75$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{v_i}}/H_1$	$x_{r_{v_f}}/H_1$	$x_{r_{v_T}}/H_1$
60	0,1	20,37% <sup>(2)</sup>	3,74% <sup>(1)</sup>	11,41%
	0,2	63,66%	2,33%	9,65%
	0,3	124,49%	1,55%	8,62%
	0,4	174,05%	1,11%	7,19%
	0,5	258,10%	0,80%	6,36%
	0,6	203,50% <sup>(1)</sup>	0,55%	5,30%
	0,7	166,95% <sup>(1)</sup>	0,32%	3,74% <sup>(1)</sup>
	0,8	141,78% <sup>(1)</sup>	0,09%	2,78% <sup>(1)</sup>
	0,9	116,09% <sup>(1)</sup>	0,13% <sup>(2)</sup>	1,77% <sup>(1)</sup>
300	0,1	324,44%	0,61%	1,37%
	0,2	283,51%	0,62%	1,30%
	0,3	241,36%	0,63%	1,24%
	0,4	199,39%	0,51% <sup>(2)</sup>	1,15%
	0,5	106,77% <sup>(1)</sup>	0,50% <sup>(2)</sup>	1,01%
	0,6	53,33% <sup>(1)</sup>	0,45% <sup>(2)</sup>	0,81%
	0,7	1,03% <sup>(1)</sup>	0,34% <sup>(2)</sup>	0,51%
	0,8	53,42%	0,18% <sup>(2)</sup>	0,05% <sup>(1)</sup>
	0,9	99,61% <sup>(1)</sup>	0,06% <sup>(2)</sup>	0,98% <sup>(1)</sup>

Tabela 34 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para  $H_2/H_1 = 0,75$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{h_i}}/H_1$	$x_{r_{h_f}}/H_1$	$x_{r_{h_T}}/H_1$
300	0,1	0,68%	1,14%	0,08%
	0,2	0,85%	0,49% <sup>(1)</sup>	0,28% <sup>(2)</sup>
	0,3	1,28%	1,84% <sup>(2)</sup>	1,25% <sup>(2)</sup>
	0,4	4,50%	25,59% <sup>(2)</sup>	8,29% <sup>(2)</sup>

$$H_3/H_1 = 0,50$$

Tabela 35 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para  $H_3/H_1 = 0,50$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{v_i}}/H_1$	$x_{r_{v_f}}/H_1$	$x_{r_{v_T}}/H_1$
60	0,9	236,65%	0,05% <sup>(1)</sup>	21,97%
	0,1	496,96%	0,79% <sup>(1)</sup>	2,76% <sup>(2)</sup>
	0,2	480,58%	0,31% <sup>(1)</sup>	3,73%
	0,3	447,52%	0,21% <sup>(1)</sup>	4,21%
300	0,4	410,83%	0,51% <sup>(2)</sup>	4,58%
	0,5	355,99%	0,89% <sup>(2)</sup>	4,81%
	0,6	295,40%	1,25% <sup>(2)</sup>	4,86%
	0,7	226,74%	1,58% <sup>(2)</sup>	4,63%
	0,8	144,97%	1,67% <sup>(2)</sup>	3,87%
	0,9	4,80% <sup>(1)</sup>	1,07% <sup>(2)</sup>	1,49% <sup>(1)</sup>

Tabela 36 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para  $H_3/H_1 = 0,50$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{h_i}}/H_1$	$x_{r_{h_f}}/H_1$	$x_{r_{h_T}}/H_1$
60	0,1	16,75% <sup>(2)</sup>	0,12% <sup>(2)</sup>	0,97% <sup>(2)</sup>
	0,2	18,55%	15,94%	6139,48%
300	0,1	0,44%	0,05% <sup>(2)</sup>	0,17%
	0,2	0,53%	0,19% <sup>(2)</sup>	0,09% <sup>(1)</sup>
	0,3	0,68%	0,27% <sup>(2)</sup>	0,12% <sup>(2)</sup>
	0,4	0,96%	0,10% <sup>(2)</sup>	0,08% <sup>(1)</sup>
	0,5	1,68%	0,34% <sup>(2)</sup>	0,52% <sup>(2)</sup>
	0,6	6,61% <sup>(2)</sup>	1,09% <sup>(2)</sup>	1,69% <sup>(2)</sup>

$$H_3/H_1 = 0,75$$

Tabela 37 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para  $H_3/H_1 = 0,75$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{v_i}}/H_1$	$x_{r_{v_f}}/H_1$	$x_{r_{v_T}}/H_1$
	0,5	55,02%	4,36%	17,51%
	0,6	150,52%	2,07%	13,76%
	0,7	256,63%	1,14%	10,75%
	0,8	200,12% <sup>(1)</sup>	0,49%	6,94%
	0,9	215,93% <sup>(1)</sup>	0,09% <sup>(2)</sup>	4,46% <sup>(1)</sup>
300	0,1	404,78%	0,51%	2,10%
	0,2	355,45%	0,69%	2,10%
	0,3	305,63%	0,84%	2,09%
	0,4	254,83%	0,97%	2,06%
	0,5	207,76%	1,08%	2,02%
	0,6	160,79%	0,92% <sup>(2)</sup>	1,89%
	0,7	112,21% <sup>(1)</sup>	0,88% <sup>(2)</sup>	1,60%
	0,8	55,21% <sup>(1)</sup>	0,67% <sup>(2)</sup>	1,07%
	0,9	56,63%	0,28% <sup>(2)</sup>	0,37% <sup>(1)</sup>

Tabela 38 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para  $H_3/H_1 = 0,75$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$x_{r_{h_i}}/H_1$	$x_{r_{h_f}}/H_1$	$x_{r_{h_T}}/H_1$
60	0,1	2,91% <sup>(2)</sup>	0,28% <sup>(2)</sup>	1,03% <sup>(2)</sup>
	0,2	0,42%	0,10% <sup>(2)</sup>	0,09% <sup>(1)</sup>
300	0,3	0,48%	0,27% <sup>(2)</sup>	0,09% <sup>(2)</sup>
	0,4	0,58%	0,31% <sup>(2)</sup>	0,11% <sup>(2)</sup>
	0,5	0,76%	0,12%	0,08% <sup>(2)</sup>
	0,6	1,22%	0,42% <sup>(2)</sup>	0,56% <sup>(2)</sup>
	0,7	3,59% <sup>(2)</sup>	1,37% <sup>(2)</sup>	1,84% <sup>(2)</sup>

Parâmetro Geométrico  $E/H_1$  $E/H_1 = 0,25$ Tabela 39 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para  $E/H_1 = 0,25$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$z/H_1 = 0,50$		
		$x_{r_{v_i}}/H_1^{(1)}$	$x_{r_{v_f}}/H_1^{(1)}$	$x_{r_v}/H_1^{(1)}$
60	$[0,1; 0,7]^{(a)}$	50,00%	50,00%	50,00%
	0,8	266,81%	6,11%	32,71%
	0,9	482,56%	4,73%	22,99%
150	0,1	722,32%	5,07%	8,79%
	0,2	607,12%	9,15%	12,85%
	0,3	508,29%	12,62%	15,77%
	0,4	426,30%	15,32%	18,24%
	0,5	360,45%	16,95%	19,51%
	0,6	309,76%	17,09%	19,38%
	0,7	278,54%	15,55%	17,42%
	0,8	277,68%	12,26%	13,72%
	0,9	475,65%	7,39%	8,22%

Tabela 40 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para  $E/H_1 = 0,25$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$z/H_1 = 0,50$		
		$x_{r_{h_i}}/H_1^{(1)}$	$x_{r_{h_f}}/H_1^{(1)}$	$x_{r_{h_T}}/H_1^{(1)}$
150	0,1	15,24%	458,53%	78,37%
	$0,2^{(b)}$	100,00%	100,00%	100,00%

 $E/H_1 = 2$ Tabela 41 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado vertical para  $E/H_1 = 2$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$z/H_1 = 0,50$		
		$x_{r_{v_i}}/H_1^{(1)}$	$x_{r_{v_f}}/H_1^{(1)}$	$x_{r_v}/H_1^{(1)}$
60	0,1	299,25%	2,96%	19,79%
	0,2	314,85%	2,61%	16,46%
	0,3	265,41%	2,59%	13,83%
	0,4	217,52%	2,35%	11,28%
	0,5	168,94%	2,22%	9,02%
	0,6	120,70%	2,10%	6,93%
	0,7	74,70%	1,78%	4,84%
	0,8	33,36%	0,99%	2,42%
	0,9	2,15%	0,38%	0,49%
150	0,1	1318,09%	6,19%	8,53%
	0,2	1875,43%	6,12%	8,29%
	0,3	2028,37%	6,10%	8,01%
	0,4	1014,00%	6,13%	7,63%
	0,5	258,39%	6,27%	7,14%
	0,6	12,15%	6,60%	6,56%
	0,7	50,00%	6,87%	6,84%
	0,8	0,00%	6,09%	6,09%
	0,9	0,00%	3,34%	3,34%

Tabela 42 – Análise de incerteza aos comprimentos de escoamento separado horizontal para  $E/H_1 = 2$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$z/H_1 = 0,50$		
		$x_{r_{h_i}}/H_1^{(1)}$	$x_{r_{h_f}}/H_1^{(1)}$	$x_{r_{h_T}}/H_1^{(1)}$
60	0,1	1000,97%	0,90%	3,18%
	0,1	2,80%	2,77%	2,75%
150	0,2	5,88%	0,36%	0,67%
	0,3	19,65%	2,10%	0,12%
	0,4	98,38%	2,77%	1,16%

## Anexo D – Análise de Incerteza aos Coeficientes de Perda de Carga

### Caso Base e Parâmetro Geométrico $\theta$

#### Caso Base

Tabela 43 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para o caso base

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K_{13}$
60	0,1	0,78%	1,53%	1,49%
	0,2	0,85%	1,45%	1,38%
	0,3	0,95%	1,35%	1,28%
	0,4	1,07%	1,22%	1,19%
	0,5	1,16%	1,09%	1,11%
	0,6	1,19%	0,99%	1,05%
	0,7	1,12%	0,91%	0,99%
	0,8	0,99%	0,85%	0,93%
	0,9	0,88%	0,80%	0,86%
300	0,1	0,00% <sup>(1)</sup>	0,15% <sup>(1)</sup>	0,13% <sup>(1)</sup>
	0,2	0,00% <sup>(1)</sup>	0,17% <sup>(1)</sup>	0,13% <sup>(1)</sup>
	0,3	0,03% <sup>(1)</sup>	0,15% <sup>(1)</sup>	0,12% <sup>(1)</sup>
	0,4	0,09% <sup>(1)</sup>	0,12% <sup>(1)</sup>	0,11% <sup>(1)</sup>
	0,5	0,28%	0,11% <sup>(1)</sup>	0,14% <sup>(1)</sup>
	0,6	0,55%	0,13% <sup>(1)</sup>	0,21% <sup>(1)</sup>
	0,7	0,99% <sup>(2)</sup>	0,17% <sup>(1)</sup>	0,34% <sup>(1)</sup>
	0,8	3,50% <sup>(2)</sup>	0,24% <sup>(1)</sup>	0,55%
	0,9	2,25%	0,31% <sup>(1)</sup>	0,71%

$\theta = 70^\circ$

Tabela 44 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para  $\theta = 70^\circ$

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K_{13}$
60	0,1	0,71	1,38	1,33%
	1	%	%	
	0,2	0,79	1,37	1,28%
	2	%	%	
	0,3	0,90	1,30	1,21%
	3	%	%	
	0,4	1,01	1,20	1,15%
	4	%	%	
	0,5	1,11	1,09	1,10%
	5	%	%	
	0,6	1,14	1,01	1,06%
	6	%	%	
	0,7	1,09	0,94	1,01%
	7	%	%	

300	0,8	0,97%	0,89%	0,94%
	0,9	0,86%	0,85%	0,85%
	0,1	0,01%	0,56%	0,46%
		% <sup>(1)</sup>	% <sup>(1)</sup>	% <sup>(1)</sup>
	0,2	0,02%	0,43%	0,31%
		% <sup>(1)</sup>	% <sup>(1)</sup>	% <sup>(1)</sup>
	0,3	0,05%	0,30%	0,22%
		% <sup>(1)</sup>	% <sup>(1)</sup>	% <sup>(1)</sup>
	0,4	0,12%	0,21%	0,18%
		% <sup>(1)</sup>	% <sup>(1)</sup>	% <sup>(1)</sup>
	0,5	0,29%	0,19%	0,21%
		%	% <sup>(1)</sup>	% <sup>(1)</sup>
	0,6	0,57%	0,20%	0,28%
		%	% <sup>(1)</sup>	% <sup>(1)</sup>
	0,7	1,35%	0,24%	0,42%
		%	% <sup>(1)</sup>	% <sup>(1)</sup>
	0,8	3,53%	0,31%	0,66%
		%	% <sup>(1)</sup>	
	0,9	1,99%	0,38%	0,75%

$\theta = 80^\circ$

Tabela 45 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para  $\theta = 80^\circ$

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K_{13}$
60	0,1	0,75%	1,55%	1,50%
	0,2	0,83%	1,49%	1,40%
	0,3	0,93%	1,39%	1,30%
	0,4	1,05%	1,26%	1,22%
	0,5	1,15%	1,14%	1,14%
	0,6	1,18%	1,04%	1,08%
	0,7	1,10%	0,96%	1,02%
	0,8	1,00%	0,90%	0,95%
	0,9	0,86%	0,85%	0,86%
300	0,1	0,01% <sup>(1)</sup>	0,40% <sup>(1)</sup>	0,35% <sup>(1)</sup>
	0,2	0,01% <sup>(1)</sup>	0,35% <sup>(1)</sup>	0,27% <sup>(1)</sup>
	0,3	0,04% <sup>(1)</sup>	0,26% <sup>(1)</sup>	0,20% <sup>(1)</sup>
	0,4	0,11% <sup>(1)</sup>	0,20% <sup>(1)</sup>	0,18% <sup>(1)</sup>
	0,5	0,28%	0,18% <sup>(1)</sup>	0,20% <sup>(1)</sup>
	0,6	0,56%	0,18% <sup>(1)</sup>	0,26% <sup>(1)</sup>

0,7	1,26%	0,22% <sup>(1)</sup>	0,38% <sup>(1)</sup>
0,8	4,26%	0,28% <sup>(1)</sup>	0,65%
0,9	2,21%	0,33% <sup>(1)</sup>	0,75%

$\theta = 110^\circ$

$\theta = 100^\circ$

Tabela 46 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para  $\theta = 100^\circ$

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K_{13}$
60	0,1	0,76%	1,23%	1,21%
	0,2	0,82%	1,18%	1,14%
	0,3	0,92%	1,10%	1,07%
	0,4	1,02%	0,92% <sup>(1)</sup>	1,01%
	0,5	1,12%	0,93%	0,97%
	0,6	1,14%	0,85%	0,93%
	0,7	1,05%	0,79%	0,89%
	0,8	0,94%	0,75%	0,86%
	0,9	0,83%	0,72%	0,81%
300	0,1	0,02% <sup>(1)</sup>	0,01% <sup>(1)</sup>	0,01% <sup>(1)</sup>
	0,2	0,00% <sup>(1)</sup>	0,05% <sup>(1)</sup>	0,04% <sup>(1)</sup>
	0,3	0,01% <sup>(1)</sup>	0,07% <sup>(1)</sup>	0,05% <sup>(1)</sup>
	0,4	0,07% <sup>(1)</sup>	0,08% <sup>(1)</sup>	0,07% <sup>(1)</sup>
	0,5	0,22%	0,09% <sup>(1)</sup>	0,12% <sup>(1)</sup>
	0,6	0,47%	0,12% <sup>(1)</sup>	0,19% <sup>(1)</sup>
	0,7	1,30%	0,17% <sup>(1)</sup>	0,44%
	0,8	4,43%	0,24% <sup>(1)</sup>	0,61%
	0,9	2,04%	0,30% <sup>(1)</sup>	0,68%

Tabela 47 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para  $\theta = 110^\circ$

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K_{13}$
60	0,1	0,82%	0,70% <sup>(1)</sup>	0,70% <sup>(1)</sup>
	0,2	0,88%	0,69% <sup>(1)</sup>	0,71%
	0,3	0,99%	0,67% <sup>(1)</sup>	0,71%
	0,4	0,74% <sup>(2)</sup>	0,64% <sup>(1)</sup>	0,73%
	0,5	1,21%	0,62%	0,76%
	0,6	1,22%	0,61%	0,79%
	0,7	1,13%	0,60%	0,81%
	0,8	0,99%	0,61%	0,82%
	0,9	0,88%	0,61%	0,82%
300	0,1	0,01% <sup>(1)</sup>	0,16% <sup>(1)</sup>	0,15% <sup>(1)</sup>
	0,2	0,01% <sup>(1)</sup>	0,08% <sup>(1)</sup>	0,07% <sup>(1)</sup>
	0,3	0,01% <sup>(1)</sup>	0,03% <sup>(1)</sup>	0,03% <sup>(1)</sup>
	0,4	0,03% <sup>(1)</sup>	0,01% <sup>(1)</sup>	0,01% <sup>(1)</sup>
	0,5	0,16% <sup>(1)</sup>	0,04% <sup>(1)</sup>	0,06% <sup>(1)</sup>
	0,6	0,48%	0,08% <sup>(1)</sup>	0,16% <sup>(1)</sup>
	0,7	1,36%	0,14% <sup>(1)</sup>	0,31% <sup>(1)</sup>
	0,8	2,60% <sup>(2)</sup>	0,22% <sup>(1)</sup>	0,52%
	0,9	1,35% <sup>(2)</sup>	0,30%	0,68%



Parâmetros Geométricos  $H_2/H_1$  e  $H_3/H_1$ 

$$H_2/H_1 = 0,75$$

Tabela 48 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para  $H_2/H_1 = 0,75$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K_{13}$
60	0,1	0,76%	1,48%	1,43%
	0,2	0,66% <sup>(2)</sup>	1,41%	1,32%
	0,3	0,72% <sup>(2)</sup>	1,28%	1,20%
	0,4	0,77% <sup>(2)</sup>	1,14%	1,08%
	0,5	0,80% <sup>(2)</sup>	1,01%	1,00%
	0,6	0,98%	0,89%	0,93%
	0,7	0,91%	0,81%	0,87%
	0,8	0,84%	0,75%	0,81%
	0,9	0,77%	0,72%	0,76%
300	0,1	0,03% <sup>(1)</sup>	0,63% <sup>(1)</sup>	0,56% <sup>(1)</sup>
	0,2	0,05%	0,65% <sup>(1)</sup>	0,52% <sup>(1)</sup>
	0,3	0,12%	0,59% <sup>(1)</sup>	0,47% <sup>(1)</sup>
	0,4	0,21%	0,50% <sup>(1)</sup>	0,43% <sup>(1)</sup>
	0,5	0,39%	0,39% <sup>(1)</sup>	0,40% <sup>(1)</sup>
	0,6	0,74%	0,33% <sup>(1)</sup>	0,42% <sup>(1)</sup>
	0,7	0,97%	0,30% <sup>(1)</sup>	0,44%
	0,8	1,02%	0,32%	0,47%
	0,9	0,41% <sup>(1)</sup>	0,33%	0,39% <sup>(1)</sup>

$$H_3/H_1 = 0,50$$

Tabela 49 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para  $H_3/H_1 = 0,50$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K_{13}$
60	0,1	0,64% <sup>(2)</sup>	2,44% <sup>(1)</sup>	2,40% <sup>(1)</sup>
	0,2	0,75% <sup>(2)</sup>	2,45% <sup>(1)</sup>	2,39% <sup>(1)</sup>
	0,3	0,96% <sup>(2)</sup>	2,36% <sup>(1)</sup>	2,50%
	0,4	1,31% <sup>(2)</sup>	2,18% <sup>(1)</sup>	2,34%
	0,5	1,89% <sup>(2)</sup>	1,92% <sup>(1)</sup>	2,13%
	0,6	2,53% <sup>(2)</sup>	1,63% <sup>(1)</sup>	1,90%
	0,7	2,34% <sup>(2)</sup>	1,48%	1,64%
	0,8	1,45% <sup>(2)</sup>	1,21%	1,35%

	0,9	1,14%	0,99%	1,08%
300	0,1	0,04% <sup>(1)</sup>	1,07% <sup>(2)</sup>	0,98% <sup>(2)</sup>
	0,2	0,02% <sup>(1)</sup>	1,34% <sup>(1)</sup>	1,13% <sup>(1)</sup>
	0,3	0,03% <sup>(1)</sup>	1,03% <sup>(1)</sup>	0,80% <sup>(1)</sup>
	0,4	0,09% <sup>(1)</sup>	0,75% <sup>(1)</sup>	0,55% <sup>(1)</sup>
	0,5	0,24% <sup>(1)</sup>	0,53% <sup>(1)</sup>	0,36% <sup>(1)</sup>
	0,6	0,59%	0,37% <sup>(1)</sup>	0,21% <sup>(1)</sup>
	0,7	4,39%	0,23% <sup>(1)</sup>	0,02% <sup>(1)</sup>
	0,8	1,70% <sup>(2)</sup>	0,05% <sup>(1)</sup>	0,30% <sup>(1)</sup>
	0,9	1,60% <sup>(2)</sup>	0,22% <sup>(1)</sup>	0,83%

$$H_3/H_1 = 0,75$$

Tabela 50 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para  $H_3/H_1 = 0,75$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K_{13}$
60	0,1	0,79%	1,94%	1,89%
	0,2	0,88%	1,87%	1,78%
	0,3	1,02%	1,57% <sup>(1)</sup>	1,65%
	0,4	0,98% <sup>(2)</sup>	1,40% <sup>(1)</sup>	1,51%
	0,5	1,15% <sup>(2)</sup>	1,22% <sup>(1)</sup>	1,37%
	0,6	1,23% <sup>(2)</sup>	1,07% <sup>(1)</sup>	1,25%
	0,7	1,12% <sup>(2)</sup>	1,03%	1,13%
	0,8	1,16%	0,92%	1,03%
	0,9	0,95%	0,84%	0,98% <sup>(1)</sup>
300	0,1	0,02% <sup>(1)</sup>	0,31% <sup>(1)</sup>	0,27% <sup>(1)</sup>
	0,2	0,01% <sup>(1)</sup>	0,20% <sup>(1)</sup>	0,16% <sup>(1)</sup>
	0,3	0,02% <sup>(1)</sup>	0,14% <sup>(1)</sup>	0,10% <sup>(1)</sup>
	0,4	0,07% <sup>(1)</sup>	0,09% <sup>(1)</sup>	0,05% <sup>(1)</sup>
	0,5	0,22%	0,06% <sup>(1)</sup>	0,01% <sup>(1)</sup>
	0,6	0,50%	0,01% <sup>(1)</sup>	0,09% <sup>(1)</sup>
	0,7	1,89%	0,06% <sup>(1)</sup>	0,25% <sup>(1)</sup>
	0,8	8,73% <sup>(2)</sup>	0,17% <sup>(1)</sup>	0,50% <sup>(1)</sup>
	0,9	12,26% <sup>(2)</sup>	0,29% <sup>(1)</sup>	0,76%

Parâmetro Geométrico  $E/H_1$  $E/H_1 = 0,25$ Tabela 51 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para  $E/H_1 = 0,25$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$K_{12}^{(1)}$	$K_{13}^{(1)}$	$K_{13}^{(1)}$
60	0,1	6,23%	4,62%	4,73%
	0,2	6,14%	4,70%	4,93%
	0,3	6,08%	4,79%	5,12%
	0,4	6,04%	4,89%	5,32%
	0,5	6,01%	5,03%	5,51%
	0,6	5,99%	5,20%	5,68%
	0,7	5,98%	5,40%	5,82%
	0,8	5,95%	5,63%	5,90%
	0,9	5,91%	5,86%	5,90%
150	0,1	9,84%	0,42%	0,93%
	0,2	9,57%	1,06%	1,98%
	0,3	8,96%	1,73%	2,91%
	0,4	8,28%	2,48%	3,80%
	0,5	7,71%	3,36%	4,68%
	0,6	7,26%	4,34%	5,50%
	0,7	6,86%	5,37%	6,13%
	0,8	6,49%	6,32%	6,43%
	0,9	6,12%	7,04%	6,29%

 $E/H_1 = 2$ Tabela 52 – Análise de incerteza aos coeficientes de perda de carga para  $E/H_1 = 2$ 

$Re_{D_{hid}}$	$\beta$	$K_{12}^{(1)}$	$K_{13}^{(1)}$	$K_{13}^{(1)}$
60	0,1	4,54%	0,29%	0,45%
	0,2	4,63%	0,31%	0,65%
	0,3	4,58%	0,39%	0,88%
	0,4	4,31%	0,54%	1,14%
	0,5	3,81%	0,75%	1,41%
	0,6	3,20%	1,03%	1,66%
	0,7	2,65%	1,33%	1,86%
	0,8	2,32%	1,61%	2,02%
	0,9	2,20%	1,84%	2,12%
150	0,1	2,67%	0,75%	0,82%
	0,2	2,50%	0,54%	0,67%
	0,3	2,80%	0,22%	0,45%
	0,4	4,09%	0,06%	0,33%
	0,5	6,26%	0,14%	0,45%
	0,6	9,79%	0,06%	0,76%
	0,7	13,52%	0,51%	1,11%
	0,8	4,32%	1,06%	1,33%
	0,9	1,39%	1,55%	1,48%